

МОДЕЛИ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Н. Маджаров

MODELS, IDENTIFICATION AND CONTROL

N. Madjarov

ТУ- София, nem@tu-sofia.bg

Abstract. The development of identification as a science and practice has a history of more than 50 years. It is central to all major international scientific and national fora (IFAC, IFIP, etc.). The number of publications in this field is also huge. The purpose of the author of this article is merely to outline the main tasks of identification as an integral part of dynamic object control. The references cited may guide the reader interested in the subject.

Key Words: Models; System Identification; Control

В голямата си част съзнателната дейност на човека се свежда до идентификация на окръжаващата го среда. Но това е само една страна на тази дейност и, може би, не най-съществената, защото в противен случай човек би се превърнал в пасивен наблюдател, а идентификацията – в самоцел. Човешкият прогрес би бил немислим, ако процесът на научното познание е еднопосочен – от обекта към субекта. Само чрез разкриване на действената страна на научното познание, която е насочена към активното въздействие върху окръжаващата ни среда (естествена или създадена от човека), с цел нейното изменение, може да определи мястото, ролята и взаимодействието на идентификацията, като наука и практика, с другите частни науки, в т.ч. и науката за целенасочено управление на тази среда.

Обекти и модели на обектите. Понятията „обект“ и „модел“ са фундаментални в теорията на управлението. Те се намират помежду си в съотношение на оригинал (праобраз) и изображение (образ). Обектът е средата, в която се осъществяват причинно-следствените връзки в окръжаващата ни природа, а моделът е имитатор (преобразувател), който позволява да се възпроизвеждат, по наше желание, тези връзки и, в частност, ефективно да се предсказва следствието по причината.

Задачата на идентификацията възниква в два случая. Първо – в процеса на познанието, когато с помощта на модела се изучава механизмът на функциониране на обекта, като обособен елемент в окръжаващата ни среда, и второ – в процеса на управлението, когато е необходимо да се съгласува поведението на обекта с условията на околната среда.

Познавателните модели нямат ориентация към конкретни приложения. Те трябва да удовлетворяват потребностите на познанието въобще и механизмът на тяхното изграждане не може да бъде сведен до прости алгоритмични процедури. Моделите от втория тип трябва да удовлетворяват конкретните потребности на управлението. Това предопределя, от една страна, повишена взискателност към възможностите на самия модел, а от друга страна позволява да се използват достатъчно формализирани процедури при изграждането им. Обект на следващото изложение са модели от втория тип.

Моделът е продукт на идентификацията на обекта. Някои влагат в понятието „идентификация“ по-широк смисъл, като включват в него и неемпирични (аналитични, изчислителни) подходи при изграждането на модела. В теорията на управлението идентификацията се разглежда като експериментална процедура върху реалния обект, тъй като тя може да се сведе до система от формални правила, почиващи на математически издържана теория и не се обвързва с всичките неудобства, свързани с технологичното, конструктивното и т.н. разнообразие на реалния обект. Разбира се, че сведения от конструктивен и технологичен характер може съществено да облекчат „експерименталната“ идентификация, особено при определяне на структурата на модела.

Моделът е описание на реалния обект на определен език. Общопознавателните модели обикновено се описват на разговорен език (лингвистични модели). Езикът на моделите за целите на управлението им е езикът на математиката (абстрактен модел). Конкретната форма, в която се реализира математичният

модел, зависи от задачата, която се решава с негова помощ. В теорията на управлението се използват всички форми на математично описание – алгебрични, диференциални, диференчни и интегрални уравнения (в т.ч. и описания в пространството на състоянията), предавателни функции, честотни и времеви характеристики, функционални разложения и т.н. Понятието „обект“ следва да се възприема в най-широкия му смисъл – от конкретно устройство до сложна съвкупност от елементи, организирани в някаква система. Обектите взаимодействат с окръжаващата ги среда, тъй като те са част от тази среда. Самото отделяне на обекта от средата е условно, до колкото такава необходимост възниква при решаване на една или друга задача. Обектът може да се „разширява“ за сметка на включване към него на нови елементи от средата, ако това се налага за по-ефективното му управление. Връзката на обекта с околната среда се осъществява по каналите на входните въздействия (входни величини, входове на обекта) и изходните сигнали (изходни величини, изходи на обекта).

Разграничаването на обекта от средата може да се опише приблизително по следния начин: Избира се някакъв предварителен модел на обекта **F1**, като част от средата, в която той функционира. С този предварителен модел, с помощта на допустимо управление и зададено въздействие на средата, трябва да се реализира зададената цел на управлението. Изпълнението на целта трябва да се проверява, напр. по експертен начин. Ако съществува допустимо управление, при което се реализира желаната цел, с това завършва и процесът на „отделяне“ на обекта от средата. В противен случай следва обектът да се „разшири“ за сметка на включване към него на нови елементи от средата. Новият модел **F2** по-успешно би реализирал желаната цел в областта на допустимите управления, за сметка на допълнително управление на новите елементи от средата, включени в обекта. Тази процедура на добавяне на нови елементи от средата към обекта продължава, докато се реши поставената задача. Трябва да се присъединяват такива елементи, които най-интензивно въздействат за постигане на желаните цели на управлението и които може ефективно да се управляват. Ако и при най-добрата процедура на формиране на модела целите не се достигат, това показва, че при зададените възможности на обекта и средата целите са недостижими и трябва да се изменят. Формализацията на така описаната процедура на структуриране на модела е свързана с големи, често непреодолими трудности и решението може да се търси по пътя на експертните оценки. Не по-маловажен въпрос при структурирането на модела е определянето на „рационалния“ брой входове и изходи на обекта, свързващи го със средата. Това може да се извърши чрез ранжиране на входовете и изходите по степента на

влиянието им при изпълнението на целите на управлението. За решаване на тази задача съществуват ефективни методи.

Моделът на обекта, в най-общия случай, може да се зададе с операторното уравнение $y=F(u)$ (или по-общия запис $F(u,y)=0$), където u и y са входовете и изходите на обекта (в общия случай векторни величини), а операторът F указва последователността от математични операции, с които системата функции u се преобразуват в системата функции y . Този модел на практика не може да отразява цялостно механизма на процесите, които протичат в реалния обект. Всеки реален обект притежава (поне теоретично) безкрайно число начини, по които той е свързан със средата, в която функционира (безкрайна размерност, т.е. притежава безкрайно число входове и изходи) и безкрайно число белези (сложна динамика, която може да се опише с диференциални уравнения от безкрайно висок ред). Очевидно моделът не може да е адекватен (абсолютно точен) с реалния обект и при съставянето му се налага редукция, както на размерността му, така и на реда. За целите на управлението на обекта е достатъчно моделът да е „изофункционален“ на обекта, т.е. да реагира по един и същи начин с него при едни и същи входни въздействия.

Синтез на модели. Под синтез на модел се означава намиране на моделен оператор F , който, в определен смисъл, е близък с „оператора“ F_0 , на обекта. Понятието „оператор“ е атрибут на математиката. В реалните обекти преобразуването на входните въздействия в изходни сигнали е резултат на механически, химически, термодинамични или други процеси. Когато се говори за „оператор“ на обекта F_0 , с това само се означава, „маркира“ резултатът от тези преобразувания. Понятието „близост на два оператора“ е твърде относително и не може да се дефинира еднозначно. Обикновено тя се оценява чрез подходящо избрана метрика (разстояние) $m(F_0,F)$, която добива нулева (или минимална) стойност при $F_0 = F$. Тъй като операторът на обекта е неизвестен, по-точно казано той не кореспондира на езика, на който е записан операторът на модела, метриката се оценява на базата на реално измерими величини, напр. изходите на обекта и на модела (изискването за изофункционалност). Пример за такава метрика е квадратичната норма (сума от квадратите на разликата от изходните величини на обекта и модела). Синтезът на моделния оператор се извършва от условието за минимална стойност на избраната метрика. Сходството на задачата на идентификацията с някои задачи от теорията на оптималното управление, теорията на статистическите решения и други утвърдени научни дисциплини е допринесло много за окомплектоването ѝ с необходимия асортимент от подходи, методи, алгоритми и друг математичен инструментариум. Но както и всяка

друга наука, така и идентификацията създава свои специфични методи за решаване на специфичните си проблеми.

Моделният оператор, както беше казано, може да се получи аналитично (изчислително) или експериментално (идентификация). Аналитичният подход много често е неизползваем, поради недостатъчната изученост на технологичните процеси, или при тяхната неповторяемост в еднотипни обекти. Не винаги задоволява и точността на получените модели, вследствие натрупването на грешки от приемане на различни, опростяващи анализа, допускания. При идентификация експериментът се извършва върху реалния обект в режим на нормалната му експлоатация, или при изкуствено създадени условия, специално създадени за целите на експеримента. Обектът се разглежда като „черна кутия“, т.е. единствената информация за процесите, които протичат в него, може да се получат чрез обработка на входните въздействия и изходната реакция на обекта.

Удобно е при идентификацията да се отделят два типа задачи. Първата е свързана със структурирането на модела, т.е. отнасянето на оператора към определен клас оператори (линейни, нелинейни, със съсредоточени или разпределени параметри, стационарни или нестационарни и т.н.). В повечето случаи структурата на модела не може за се определи по експериментален път, а се определя по аналитичен или експертен начин. Наличието на добре обоснована допълнителна информация за обекта може съществено да облекчи структурната идентификация. Така например, ако има достатъчно основание да се приеме, че моделът е от класа на линейните оператори, задачата на структурната идентификация може да се сведе до несравнимо по-простата задача за определяне на реда на линейното диференциално (диференчно) уравнение.

При определена структура на модела, задачата на идентификацията се свежда до оценяване на определен брой параметри на модела (напр. коефициентите на диференциалното уравнение). Това е вторият тип задача, която може да се означава като „параметрична идентификация“, или просто – оценяване на параметри. За разлика от структурната идентификация, параметричната идентификация разполага с достатъчно обосновани и проверени на практика методи.

Класификация на моделите. Идентификацията на обектите не е самоцелна задача, а етап при решаване на друга, по-обща задача. Първото и основно ограничение на класа на допустимите модели е ограничението за тяхната физическа реализуемост. Моделът е физически реализуем, ако изходната му величина y не зависи от бъдещи стойности на входната величина u . Такива модели не противоречат на принципа на причинно-следствената връзка и съществува, поне потенциална

възможност, да се реализират като физически устройства (точно или приблизително). Второто ограничение на класа на допустимите модели е ограничението за „екстраполацируемост“, т.е. моделът, получен при идентификацията му чрез обработка на определен набор експериментални данни, да удовлетворява и всеки друг набор от данни, получени от реалния обект. С други думи, с модела трябва да се обясняват всички ситуации, които възникват в реалния обект, а не само тези, на базата на които е изграден. Това е необходимо, тъй като с модела се синтезира управление на обекта, който трябва да реализира целите на управлението при всички обстоятелства, предвидени и непредвидени в процеса на идентификацията.

За идентификацията от значение са някои структурни свойства на модела, основните от които са:

- *Линейност.* Това са модели, които удовлетворяват принципа на суперпозицията, т.е. реакцията им на сума от няколко входни сигнала да е еднаква на сумата от реакциите на всеки един от тях. В противен случай моделът е нелинеен. Свойството „линейност“ е фундаментално. То лежи в основата на линейната теория на управлението (така също и на линейната идентификация), която, поне за сега, е най продуктивната област в теорията и практиката на автоматичното управление.
- *Стационарност.* Това са модели с постоянни във времето свойства, т.е.

$$y(t-t_0) = F[u(t-t_0)],$$

за всеки начален момент t_0 . В противен случай моделът е нестационарен. Моделирането на нестационарни обекти не е тривиална задача. За това се изисква определена „стабилност“ на нестационарността. Това означава, че за да може нестационарността на обекта да се „заложат“ в модела, тя трябва да може да се опише. Описанието може да е с детерминирана функционална зависимост (модели с детерминирана нестационарност) или с вероятностни характеристики (стохастични модели). Когато нестационарността в обекта не може да се опише, моделирането губи смисъл.

- *Динамичност.* Това са модели с „памет“, в които е включена част от „праисторията“ на процесите в обекта. Това най-често са диференциални (диференчни) уравнения. В противен случай моделът е статичен (без памет).
- *Непрекъснатост.* Това са модели, които се описват с непрекъснати във времето функционални (или други) зависимости. В противен случай моделът е дискретен във времето. Преобладаващата част от обектите са от непрекъснат тип. Дискретният във времето

вход и (или) изход не винаги е указание за дискретност на процесите в самия обект. Непрекъснатите модели могат да бъдат дискретизирани „вторично“, ако идентификацията или управлението на обекта налага това. Дискретизираният модел по принцип е по-малко „информативен“ от непрекъснатия модел, поради неизбежната загуба на информация при дискретизацията, но дискретното (цифрово) управление води до по-прости и ефективни алгоритми и технически решения.

Линейни модели. Най-универсален параметричен модел на линейните непрекъснати динамични системи е уравнението

$$A(p)y(t)=B(p)u(t),$$

където $A(p)$ и $B(p)$ са полиноми по степените на p , а t е текущото време. Ако p е оператор на диференциране, моделът е представен като линейно диференциално уравнение. Ако p се разглежда като комплексен параметър в преобразованието на Лаплас, моделът е представен като предавателна функция

$$W(p) = A(p)/B(p).$$

Диференциалното уравнение е изчерпателен модел на линейни обекти, ако са зададени начални условия за $y(t)$ и на производните му до $n-1$ степен (n е редът на полиномите).

Предавателната функция е изчерпателен модел на линейни обекти при нулеви начални условия. При еднакви множители в числителя и знаменателя на предавателната функция (еднакви „нули“ и „полюси“ в предавателната функция), те се съкращават и редът на модела се редуцира. Наличието на такива „диполи“ в предавателната функция е указание за непълна управляемост или непълна наблюдаемост на обекта, т.е. с предавателна функция може да се опише само управляемата и наблюдаема част на обекта. Предавателната функция $W(p)$ и тегловната функция $w(t)$ на обекта по информативност са от един и същи ранг, тъй като те еднозначно са свързани с правото и обратното преобразование на Лаплас.

Дискретният аналог на линейните непрекъснати динамични модели е уравнението

$$A(z)y(k)=B(z)u(k),$$

където $A(z)$ и $B(z)$ са полиноми по степените на z . Ако z е оператор на крайно нарастване, моделът е представен като линейно диференчно уравнение. Ако z се разглежда като комплексен параметър в дискретното Z -преобразование, моделът е представен като предавателна функция

$$W(z) = A(z)/B(z).$$

Казаното по-горе за предавателната функция на непрекъснатата система е в сила и при дискретната предавателна функция.

В теорията на управлението се използват и модели в пространството на състоянията (матричен запис на диференциалните и диференчните уравнения във формата на Коши)

$$dx/dt = Ax(t)+Bu(t),$$

$$y(t) = Cx(t)+D(u),$$

респективно

$$x(k+1) = Ax(k)+Bu(k),$$

$$y(k) = Cx(k)+D(k).$$

Тези модели са изчерпателен модел на линейни обекти, ако са зададени начални условия $x(t_0)$, респективно $x(k_0)$.

Трансформацията на моделите от един вид в друг (напр. непараметричен в параметричен) на практика влошава точността на новополучените модели. Желателно е моделът да се избира такъв, какъвто ще се използва след това при синтеза на управление на обекта.

Идентифицируемост на обекта. Първото условие за пълна идентифицируемост на обекта е той да бъде управляем и наблюдаем. Това следва от факта, че в напълно или частично неуправляеми обекти всички или част от собствените му честоти (състояния) не могат да бъдат възбудени, независимо от вида на входните въздействия, следователно тези честоти ще останат скрити в изходната реакция на обекта. При напълно или частично ненаблюдаеми обекти всички или част от собствените му честоти не се появяват на изхода на обекта, независимо, че те са възбудени от входните въздействия. Следователно идентифицируемостта на обекта добива правата на структурно свойство на обекта, каквито са и понятията управляемост и наблюдаемост. Разбира се, че идентифицируемостта на обекта е свързана с вида на входните сигнали, които трябва да удовлетворяват условието за „постоянно възбуждане“, т.е. да съдържа честоти, които да възбудят собствените честоти на обекта. За целите на управлението не се налага неуправляемите и ненаблюдаеми състояния до присъстват в модела на обекта.

Редукция на моделите. Редукцията (апроксимацията) на модела е многопластов процес. Тя започва още при съставянето на модела, като се редуцира размерността и редът му, съобразно възможностите за техническата реализация на идентификацията, и неговото приложение (синтез на управление на обекта). Вторият етап на редукция е

свързан с отстраняване на линейно зависимите състояния в модела, които ненужно повишават неговия ред. Третият етап на редукция (особено важен при синтез на управление на обекта) е намиране на минималната му реализация (отстраняване на неуправляемите и ненаблюдаеми състояния). И последният етап на редукция (под минималната му реализация), която обикновено се налага при модели с много висок ред, е да се запазят само тези състояния, които са съществено важни за реализацията на целите на управлението на обекта, без да се нарушават основните динамични свойства на модела – устойчивост, управляемост и наблюдаемост. За реализацията на всички тези редукции са разработени ефективни методи. Основни от тях са методите за декомпозиция на някои основни характеристики на обекта по сингулярни стойности (напр. на грамианите на управляемост и наблюдаемост), като се редуцират (премахват от модела състоянията, които съответстват на малки сингулярни стойности). Друг метод за редукция на модела е ортогоналната апроксимация на системните грамиани (или на други характеристики на обекта, напр. тегловната му функция) в полиномиален ред на Лагер, Лежандър и др., като се запазват в разложението само тези членове, които осигуряват достатъчно малка грешка на апроксимирания модел.

Идентификация и управление. Идентификацията, като средство за получаване на модел на обекта за целите на управлението му, трябва да отговаря на три основни изисквания: **1.-** да съществува разработена теория за синтез на управление, която е адекватна на избрания клас модели, **2.-** класът на идентификационните сигнали да удовлетворява условията за идентифицируемост и **3.-** критериите за еквивалентност на обекта и модела му да бъдат адекватни на целите на управлението.

Обикновено идентификацията на обекта предшества синтеза на управлението му. В някои случаи (напр. при адаптивното управление) идентификацията на обекта и управлението му трябва да се разглеждат като единен процес, тъй като тя присъства през цялото време на функциониране на обекта.

Съществува голям асортимент от подходи, методи и алгоритми за оценяване на параметри на модели, описани в класическия базис (предавателни функции, честотни и времеви характеристики) и в пространството на състоянията. Дискретните (във времето) модели имат определено преимущество при идентификацията на обекта, при синтеза на управление и при компютърната реализацията на това управление. Дискретните описания са не само удобни за компютърната им интерпретация и обработка, но и редица проблеми на филтрацията, оценяването и организацията на управлението се решават алгоритмично по-просто. Въпреки относително голямото разнообразие на методите за параметрична идентификация, в голямата си част тези методи се базират на класическата процедура на най-малките квадрати.

Методът на най-малките квадрати е сравнително най-малко ангажиран по отношение на количеството и качеството на априорната информация за идентифицируемия обект и средата, с която той взаимодейства. Тази му универсалност, обаче, в повечето случаи е за сметка на качеството на получените оценки на параметрите на модела. Централен в този смисъл е проблемът за „неизместеност“ на оценките (детерминирана грешка), който широко се дискутира в литературата. Използват се различни модификации на метода на най-малките квадрати за получаване на неизместени оценки (обобщени най-малките квадрати, разширен матричен метод, метод на спомагателните матрици и др.). Съчетаването на метода на най-малките квадрати с корелационния анализ е един от начините за получаване на неизместени оценки. Съществуват и други, не по-малко ефективни методи за оценяване (като методът на максималното правдоподобие, Бейс-филтрацията, стохастичната апроксимация и т.н.), които също са обект на интензивна разработка. Управлението на входа на обекта в процеса на идентификацията му (т.нар. активни методи) способства за получаване на по-устойчиви решения и по-добра сходимост на процедурите на оценяване. Като идентификационни входни сигнали най-често се използват двоични случайни или псевдослучайни последователности, които имат широк равномерен честотен спектър и осигуряват „постоянно възбуждане“ на обекта. Процедурите на оценяване на параметрите на модела могат да се реализират по два начина – рекурентни (блочни), при които входно-изходните данни от обекта се получават предварително и след това се обработват наведнъж (в блок) и рекурентни, при които данните от обекта се получават и обработват текущо (в реално време), какъвто е случаят при адаптивното управление.

При адаптивното управление идентификацията на обекта се осъществява в затворения контур на системата за управление, което налага специфични изисквания. При управление при непълна информация за състоянието на системата (с обратна връзка по състоянието) и непълна информация за параметрите на модела на обекта може да се организира процедура за съвместно оценяване на състоянията и параметрите (векторът на състоянието се разширява с вектора на неизвестните параметри) и се използва подходящ наблюдател (филтър на Калман). Ефективен в този случай е и методът на многомоделно управление (с усреднен модел, като претеглена сума от модели с параметри в някакво зададено параметрично пространство. Тегловните коефициенти се определят от условията за минимум на грешката на усреднения модел). Методът работи и при нестационарни обекти и даже при обекти с гладка нелинейност.

Развитието на идентификацията като наука и практика има своята, повече от 50 години, история. Тя заема централно място във всички големи международни научни и национални форуми (ИФАК, ИФИП и др.). Огромен е и броят на публикациите в тази област.

Целта на настоящата статия е само да очертае основните задачи на идентификацията, като неразделна част от управлението на динамични обекти. Цитираните по-долу литературни източници могат да ориентират читателя, интересуващ се от тази проблематика.

Литература

1. Вучков И. Н. Идентификация, ИК Юрапел, С., 1996
2. Гарипов Е. Идентификация на системи. Изд. на ТУ-София, 2007. (Учебник за ВУЗ – систематично изложение на основните методи за идентификация на динамични обекти)
3. Маджаров Н. Двоични псевдослучайни последователности и използването им за идентификация на обектите за автоматизация. Годишник на ВМЕИ-София, т. XXIV, кн. 4, 1969
4. Маджаров Н. Модели и идентификация на обектите на управление. Автоматика и информатика, № 2, 26-31, 2007 (Обзор)
5. Маджаров Н., Л. Михайлова. Адаптивни мултимоделни алгоритми за наблюдение и управление на стохастични системи. Автоматика и информатика, № 2, 1998
6. Растринин Л., Н. Маджаров. Введение в идентификация на обектов управление. Изд. „Енергия”, Москва, 1977. (Книгата е обзор на видовете модели на обекти, класифицирани по четири признака – статични и динамични, детерминирани и стохастични, линейни и нелинейни, непрекъснати и дискретни, както и методите за идентификация, класифицирани по три признака – пасивни (в режим на нормална експлоатация на обекта) и активни (със специални идентификационни сигнали), адаптивни и неадаптивни, дискретни и непрекъснати (в зависимост как се изменят параметрите на модела в процеса на идентификация))
7. Растринин Л., Н. Маджаров, С. Марков. Оценяване на параметри и състояния на динамични обекти. Изд. „Техника”, София, 1978 (Оценяване на параметри на нелинейни модели. Съвместно оценяване на параметри и състояния на линейни и нелинейни обекти (разширен филтър на Калман))
8. Deb A. S. Roychoudhury. Control System Analysis and Identification with MATLAB®. Block Pulse and Related Orthogonal Functions, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019; ISBN-13: 978-1-1-138-30322-5
9. Goodwin G.C., R.L. Payne. Dynamic System Identification. Experiment Design and Data Analysis, Academic Press, N.Y., 1977; ISBN 0-12-289750-1
10. Grauer J.A., J.E. Hubbard, JR. Flight Dynamic and System Identification for Modern Feedback Control, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2013; ISBN 978-0-857709-466-7
11. Isermann R. Identifikation dynamischer Systeme 1. Grundlegende Methoden, Springer-Verlag, Berlin, 1992; ISBN-13: 978-3-642-84680-9; DOI: 10.1007/978-3-642-84679-3 (Фундаментална монография по проблемите на идентификацията)
12. Keesman K.J., System Identification. Springer-Verlag Ltd., London, 2011; ISBN 978-0-85729-521-7; DOI 10.1007/978-0-85729-522-4
13. Klee H., R. Allen. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB® and Simulink®, (3rd Ed.), CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018; ISBN-13: 978-1-4987-8777-2
14. Ljung L. System Identification. Theory for the User (2nd Ed.), Prentice Hall PTR, 1999; ISBN 978-0-13-656695-2
15. Ljung, L. System Identification Toolbox™ Getting Started Guide, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2016. Available on <http://www.mathworks.com>
16. Madjarov, N., L. Mihaylova. A Multiple Model Adaptive Kalman Filter Algorithm for Continuous System. Comptes rendus de L'Academie Bulgare des sciences, tome 51, № 9, 2000
17. Madjarov N., L. Mihaylova. A Multiple Model Algorithm for Discrete Systems State Estimation. Comptes rendus de L'Academie Bulgare des sciences, tome 53, № 1, 2000
18. Madjarov N., T. Slalov. Parallel Parameters and States Estimation in Linear Stochastic Systems. Information Technologies and Control, Sofia, Year 1, №1, 2003
19. Mikleš J., M. Fikar Process Modelling, Identification, and Control. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2007 ISBN 978-3-540-71969-4
20. Modelling, Identification and Control Methods in Renewable Energy Systems (Ed. By N. Drebel and Q. Zhu), Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019; ISBN 978-981-13-1944-0; DOI 10.1007/978-981-13-1945-7
21. Nelles O. Nonlinear System Identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models. Springer-Verlag, Berlin, 2001; ISBN 3-540-67369-5
22. Sage A.P., J.L. Melsa. System Identification, Academic Press, N.Y., 1971
23. Söderström T. and P. Stoika. System Identification. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989. (Фундаментална монография по проблемите на идентификацията)
24. Tangirala A. Principles of System Identification. Theory and Practice, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2015; ISBN-13: 978-1-4398-9602-0
25. Verhaegen M., V. Verdult. Filtering and System Identification. A Least Squares Approaches. Cambridge University Press, Edinburgh, 2007; ISBN-13:978-0-521-87502-7