

МНОГОМОДЕЛНО УПРАВЛЕНИЕ С ОТКРИВАНЕ И КОМПЕНСИРАНЕ НА НЕИЗПРАВНОСТИ

Александър Ищев

Факултет автоматика, Технически университет – София, София 1000, бул. Климент Охридски 8, тел +35929652420, e-mail: ichtev@tu-sofia.bg

Резюме: В тази статия се комбинират задачи за диагностика и управление при настъпили неизправности. При решаването им се предлага да се използва многомоделен подход. Той позволява да се откриват и компенсират както частични неизправности, така и много едновременно настъпващи неизправности. Предлагат се формули и две схеми за компенсиране на нежелания ефект, предизвикан от неизправности в измервателни устройства.

Ключови думи: диагностика на неизправности, управление при неизправности, компенсиране на неизправности, многомоделен подход.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

С непрекъснатото нарастване на сложността на обектите за управление, на броя на управляемите променливи, на изискванията за качество на системите за автоматично управление нараства и тяхната сложност. Използват се все повече измервателни устройства, изпълнителни устройства и други компоненти. При това се увеличава вероятността за възникване на неизправности [1], [2].

Съгласно дефиницията, предложена от техническият комитет на ИФАК, неизправност е всяко неправомерно отклонение на поне едно характерно качество на системата от нейните допустими обикновени (стандартни) условия [1]. За разглежданите по-долу алгоритми е важно, че тези отклонения включват както постепенно, така и частично влошаване на характеристиките на някои устройства или компоненти на системата.

Неизправностите често водят до нежелани последици за обекта или за околната среда. Щетите от тях може да са големи, особено в случаите когато системата е напълно автоматична. Непрекъснато се засилват и изискванията за безопасност, както и за високи надеждностни показатели на системите. За да се удовлетворят тези изисквания, е необходимо да се използват ефективни методи за диагностика на неизправности в реално време. Следваща

стъпка е реализирането на своевременни промени в управляващото устройство, така че системата да запазва своята работоспособност дори и при появата на неизправности. По този начин се постига локализиране на неизправността в рамките на засегнатия компонент и се предотвратява разпространяването на негативният ефект върху цялата система. Това е изключително изискване към някои сложни и особено отговорни системи, каквито например са жизнено важните системи в самолетите.

В тази статия се търси комбинирано решение на двете основни задачи - диагностика на неизправности и компенсиране на вредните им ефекти, при реализирането на така наречените „толерантни към неизправности системи”, т.е. системи, които запазват своята работоспособност дори и след настъпването на неизправности.

2. ДИАГНОСТИКА НА НЕИЗПРАВНОСТИ

Всяка система за диагностика решава задължително първите две от следните три задачи [3]:

- *Откриване* на неизправност чрез констатиране на нейното наличие;
- *Изоллиране* на неизправност чрез локализиране на нейното местоположение;

- *Идентифициране* на неизправността чрез определяне на нейната големина.

При диагностиката на неизправности традиционно се използва директен или така наречения *хардуерен излишък*. При него са необходими специални хардуерни канали или компоненти, за да се получат допълнителни сигнали, които обикновено чрез директно сравнение формират така наречените остатъчни грешки или *остатъци* от несъответствието на поведението на изправни и неизправни компоненти в изследваната система. Най-често с метода на т. нар. „гласуване” се открива местоположението на съответната неизправна компонента.

Другият основен подход използва *аналитични излишъци*. При него вместо допълнителен хардуер се определят аналитични зависимости между отделни сигнали за получаване на остатъците. Именно този подход за диагностика на неизправности се има в предвид тук.

След настъпването на неизправност е необходимо алгоритъмът за генериране и обработка на остатъците да открие и да изолира неизправността. Това създава предпоставки да се осъществи реконфигуриране или реструктуриране на системата по такъв начин, че само незасегнатите от неизправността канали /компоненти/ или сигнали да продължат да участват в нейната по-нататъшна работа. В някои случаи се използват предварително подготвени закони на управление, които се активират при сигнал за настъпване на съответната неизправност. Друга възможност е да се променят параметрите на управляващото устройство в зависимост от информацията, постъпила от системата за откриване и изолиране на неизправности.

3. МНОГОМОДЕЛЕН ПОДХОД

Многомоделният подход може да се използва както за решаване на задачата за диагностика, така и за управление при неизправности. Името на подхода подсказва, че методите за диагностика са базирани на модели на обекта. Идеята е, че при настъпването на неизправност системата се променя и, следователно, се

променя и нейното описание, т.е. променя се нейният модел. При многомоделния подход за диагностика предварително се оценяват възможните неизправности. След това се съставя моделно множество $M : M_1, M_2, \dots$. То включва в себе си както номиналния модел на системата, така и всички модели, отговарящи на съответни неизправности [2]. Задачата за диагностика на неизправности се свежда до определяне кой от моделите от моделното множество „съответства” в най-добра степен на моментното състояние на наблюдаваната система. Предимство е директната връзка между неизправност и съответен модел, което позволява много лесно да се открие коя неизправност е настъпила. Определянето на действителният за момента математичен модел може да се използва за целите на управлението.

Диагностиката на неизправностите обикновено се прави като се тестват хипотези, чиято цел е да се определи моделът в дадения момент, т.е. да се извърши избор на един модел M_i от моделното множество M . Втората част е реализиране на управление, което е определено на базата на избрания модел. Главният недостатък на този подход е, че той позволява само „твърдо” решение, т.е. само един модел от моделното множество може да бъде избран в даден момент [4]. Подходът не дава добро представяне на частичните неизправности (по-голямо или по-малко влошаване на характеристиките на съответната компонента), което води до незадоволително управление. Разбира се, съществува възможността да се разшири моделното множество, като към него се добавят модели, които представляват и частични неизправности, но това също не е добро решение, защото, когато моделите станат прекалено близки един до друг, възникват проблеми със статистическото им тестване. Други проблеми при подобни реализации възникват в моментите, когато от един модел системата се превключва в друг. Тогава се получават скокове в управлението.

Един от начините да се преодолеят споменатите по-горе проблеми е моделното множество M да се разшири до линейни

диференциални включения - множеството от всички обекти, които са изпъкнала комбинация от N модела в M :

$$M = \sum_{i=1}^N \mu_i M_i, \quad \sum_{i=1}^N \mu_i = 1 \quad (1)$$

Всеки от елементите на вектора μ съответства на един модел и представлява вероятността този модел да е истинският в даден момент. Известен като моделна вероятност, този вектор може да бъде изчислен по различни начини, напр., с използване на критерий за близост [5] или на базата на оптимизационна процедура [6].

4. УПРАВЛЕНИЕ ПРИ НЕИЗПРАВНОСТИ

Поради голямото разнообразие на възможни неизправности, на тяхното местоположение и на тяхната степен, е трудно да се предложи единен подход за неутрализиране на вредните им ефекти чрез използването само на аналитичен излишък. В настоящата статия се представят три авторски схеми за реализиране на управляващи устройства, които работят и при частични неизправности. Първата схема действа на базата на реконфигуриране в реално време на управляващото устройство, а останалите две използват компенсация на ефекта предизвикан от неизправностите.

Понеже всички възможни модели на обекта могат да се представят като изпъкнала комбинация от моделите в множеството M , то логично е да се предложи [2] управляващото въздействие да се изчислява като същата претеглена сума от отделните (частните) управления (т.е. управленията, изчислени на базата на съответен модел от моделното множество). Оптималността на получената система не е доказана, но се гарантира нейната устойчивост и запазване, до известна степен, на нейните качествени показатели [2]. Подобен подход се използва и тук. В общия случай системата има вида показан на Фиг. 1. Тя съдържа набор от управляващи устройства ($УУ_1 \div УУ_N$) за всеки от моделите в моделното множество. На базата на изходите y_i и състоянията x_i на моделите и на измерения изход y от

обекта се изчисляват моделните вероятности и се оценява състоянието \hat{x} на обекта. Управляващото устройство (УУ) реализира обратна връзка по оцененото състояние.

В частния случай, когато всички състояния са и изходи на обекта, е възможно да се използва схемата показана на Фиг.2. Предимството е в по-лесното прилагане на метода и по-малките изисквания към необходимата изчислителната мощ на управляващото устройство. При това положение управляващият сигнал към обекта се изчислява по формулата:

$$u(k) = \sum_{i=1}^N u_i(k) \mu_i(k) \quad (2)$$

където $u_i(k)$ е управлението, изчислено на базата на управляващото устройство за i -тия модел. В този случай задачите за диагностика и управление при неизправности са обединени.

5. УПРАВЛЕНИЕ ЧРЕЗ КОМПЕНСАЦИЯ НА ЕФЕКТИ, ПРЕДИЗВИКАНИ ОТ НЕИЗПРАВНОСТИ

В някои случаи, особено когато неизправността е в измервателното устройство, ефектът от неизправността може да бъде напълно неутрализиран и чрез компенсиращи въздействия. Общата идея може да се поясни по следния начин: в резултат на частична неизправност в измервателното устройство измерваната стойност е неточна. Управлението, обаче, трябва да се определи не по неточната стойност, а по реалния изход.

При наличието на частична неизправност в измервателно устройство, само един от моделите в моделното множество M представлява правилно обекта и това е неговият номинален модел (моделът без наличие на неизправности). При това положение управляващото въздействие към обекта трябва да се подаде по такъв начин, че да компенсира ефекта от неизправността в измервателното устройство. Един от начините да бъде направено това е да се направи компенсация чрез модификация на заданието. Това е предложено в раздел 5.1. Реализацията на такава компенсация е много проста за едномерните системи. При

многомерните системи трябва да се вземе под внимание ефектът на взаимовръзките между различните входове и изходи. В такива случаи е по-подходящо да се извърши директно реконструиране на изходната променлива (модификация на измерването), което се предлага в раздел 5.2.

5.1. МОДИФИКАЦИЯ НА ЗАДАНИЕТО

При системи с отрицателна обратна връзка по изхода, заданието се подава на входа на системата, за да се формира желаната стойност на изхода. При наличие на неизправност в измервателно устройство се получават грешни измервания. Целта на компенсацията в този случай е да се модифицира заданието, така че да съответства на новите измервания, и това може да се реализира с показаната на Фиг.3 схема. Ако например, от системата за диагностика е констатирана 50%-та неизправност в измервателното устройство, то управляващото устройство ще увеличава управлението докато разликата между заданието и измерения сигнал не стане равна на нула. За примера с 50% намаление на измерванията ще се окаже, че системата за управление ще се стреми да реализира двойно по-голяма от желаната стойност на изхода. Това може да се избегне, ако се зададе 50% по-малко задание. Тогава разликата между изход и задание ще е нула, когато обектът има желания изход.

В случая, когато от системата за диагностика на неизправности е констатирано, че е настъпила частична неизправност в обекта на управление и се познава ефектът на тази частична неизправност, то този нежелан резултат също може да се компенсира чрез модифициране на заданието.

При едномерна система, може да се предложи следната формула за изчисляване на модифицираното задание:

$$r_m(k) = r_n(k) - y_1(k) + \sum_{i=1}^N \mu_i(k) y_i(k) \quad (3)$$

Тук y_1 е изход на номиналния модел (без неизправности), r_n - номиналното задание (желаното задание за номиналната система), а r_m - модифицираното от

алгоритъма задание. y_i е изход на i -тия модел, а μ_i - неговата моделна вероятност.

Както лесно може да се провери, при работа в номинален режим ($\mu_1 = 1$; $\mu_i = 0$ за $i = 2, 3, \dots, N$) двата последни члена във формулата (3) взаимно се компенсират и $r_m(k) = r_n(k)$, т.е. се използва номиналното задание. При неизправност се нулират първите два члена в дясната страна на равенство (3) (в установен режим и при липса на грешна от моделиране и шумяване на обекта те са идентични). Това е предимство на алгоритъма, а не недостатък, т.к. дори и при липса на неизправност, грешката на управлението трябва да се отработи, а шумовата компонента се елиминира от филтъра на управляващото устройство. Заданието се модифицира в зависимост от моделните вероятности на съответните неизправности и изходите на съответните модели. Друго предимство е, че алгоритъмът позволява да се модифицира заданието, когато в системата е настъпила немоделирана неизправност, която е изпъкнала комбинация от моделирани неизправности. Формула (3) може да бъде обобщена и за по-общия случай на многомерна система.

5.2. РЕКОНСТРУИРАНЕ НА ИЗХОДА

Основната цел е същата както в предишния раздел - да се компенсира неизправността. Разликата е, че тук въпросът е: Възможно ли е да се реконструират истинските изходи на обекта на базата на моделите на обекта и информацията, че неизправността присъства в обекта. Този подход е по-естествен (по-интуитивен) от предишния и може по-лесно да се приложи особено за многомерни системи, защото не е необходимо да се отчита ефектът на взаимосвързаност между входовете. Работната схема е показана на Фиг.4.

Предлаганата тук формула за изчисляване на реконструирания изход на обекта y_m за случая на едномерна система е

$$y_m(k) = y_o(k) + y_1(k) - \sum_{i=1}^N \mu_i(k) y_i(k) \quad (4)$$

където y_0 е измереният изход на обекта. Тази формула също може да бъде обобщена и за многомерна система.

Компенсацията на неизправности при изпълнителните устройства също може да бъде направена по предложените схеми в този и в предишния раздел 5.1. Решението обаче има недостатък. Нека например е констатирана частична неизправност в изпълнително устройство, причината за която може да е на входа на обекта - например да се дължи на увеличено триене. В този случай, за да компенсира неизправността, управляващото устройство ще увеличи входното въздействие. При това положение може да възникнат проблеми с евентуални ограничения на входния за обекта сигнал. В такъв случай е по-добре тези неизправности да се разглеждат с метода, коментирания в раздел 4 - като многомоделен хибриден модел. В този случай се променя управляващото устройство, вместо да се модифицират/реконструират заданието или изходите.

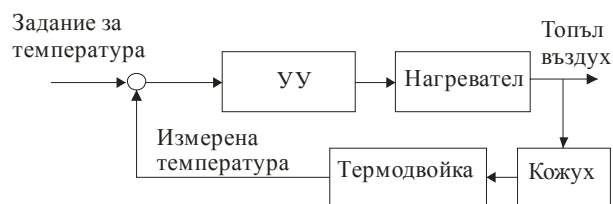
6. ПРОВЕДЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

6.1. ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

За провеждането на експериментите е използвана система за пренос на топлина, състояща се от вентилатор, който духа въздух в тръба. На входа на тръбата е монтиран нагревател (подобно на сешоар). Температурата в тръбата се измерва от термодвойка, монтирана в кожух. Вход на системата е напрежението приложено на електрониката, която захранва нагревателя. Изход на системата е напрежение, получено от термодвойката. Частична неизправност се симулира чрез завъртане на кожуха на термодвойката, като по този начин се ограничава въздушният поток около измервателното устройство.

Блок-диаграмата на затворената система е показана на Фиг. 5. Управляващото устройство е ПИД регулатор, чиито настройки за синтезирани предварително и зависят от моделите в използваното множество. В проведения експеримент се използват два модела – единият е за изправен (номинален) обект и един за максимална неизправност в обекта (при

максимално завъртане на кожуха на термодвойката).

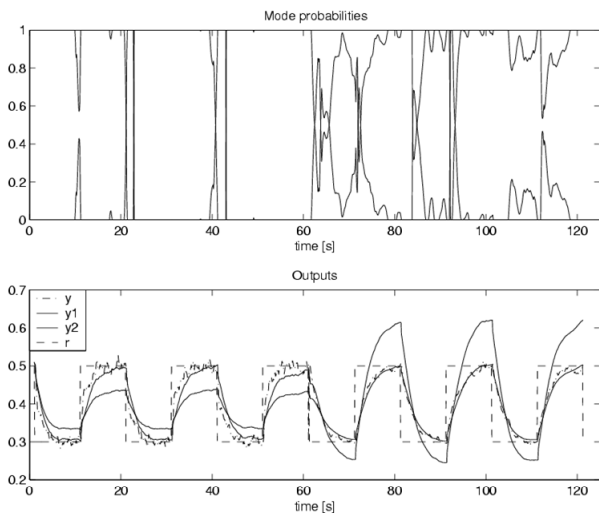


Фигура 5. Блок схема на системата за пренос на топлина.

Експерименталното поведение на изправната и неизправната система за управление се описва на базата на входно-изходни данни чрез два размити (Такаги-Сугено) модела с точност до конкретни параметри. По време на експеримента се променя заданието за температурата, като се използват правоъгълни импулси с нива 0.3 (38 градуса) и 0.5 (46 градуса) и период 20 секунди.

6.2. КОМПЕНСАЦИЯ НА ЕФЕКТА НА НЕИЗПРАВНОСТТА.

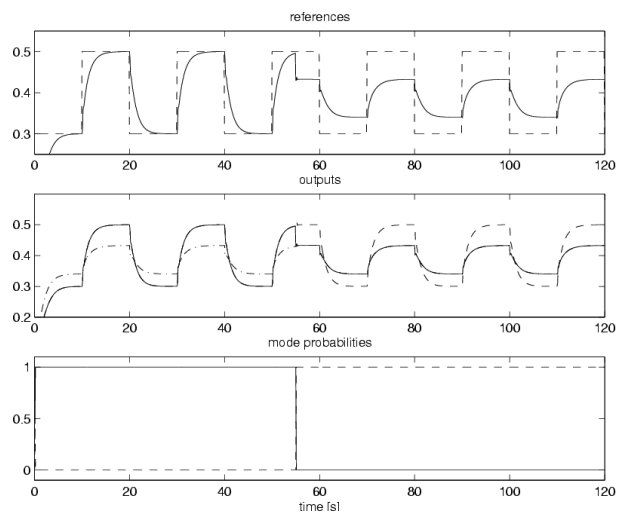
За целта се използва схемата представена на Фиг.2 и формула (2). Проведен е експеримент в реално време със системата. През първата минута (60 сек.) системата е изправна. През втората минута на експеримента присъства неизправност в обекта (модел 2). Моделните вероятности са изчислени с помощта на оптимизационна процедура, описана в [6]. Те са представени на Фиг. 6а. Както може да се види работният режим се определя коректно. Малък проблем се забелязва само в моментите на промяна на работната точка във Фиг.6б, където са показани заданието (представено с пунктирна линия), изходът на системата (с линия от точки и тирета) и изходите на двата модела (с непрекъснати линии).



Фигура 6. Компенсация на неизправностите (а. - моделни вероятности, б. - сигнали на системата).

6.3. МОДИФИКАЦИЯ НА ЗАДАНИЕТО.

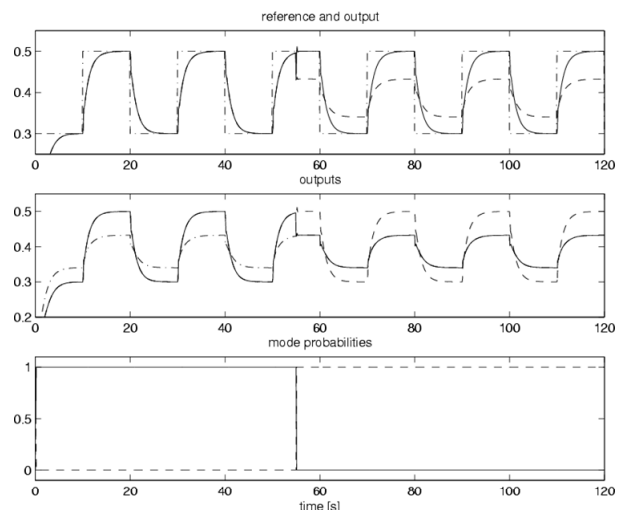
Резултатите от експеримента са получени чрез прилагане на формула (3) в схемата от Фиг. 3. На Фиг. 7а са представени заданието (с пунктирна линия) и модифицираното задание. На Фиг. 7б са показани изходите от двата модела (съответно с линии от тирета и тирета и точки), както и измереният изход на системата (с непрекъснатата линия). Истинският изход (измервания с изправно измервателно устройство) е същият както на първия модел. Както може да се види, той следва заданието, дори и след настъпването на неизправността (в 55тата секунда). На Фиг. 7в са представени моделните вероятности за двата модела (с плътна линия за първия модел и с пунктирна за втория модел), които се определят правилно за целия диапазон. Методът за управление при наличие на неизправности работи по-добре отколкото представения в предишния раздел 6.2 без модификация на заданието.



Фигура 7. Модификация на заданието (а. - задание, б. - изходи и в. - моделни вероятности).

6.4. РЕКОНСТРУИРАНЕ НА ИЗХОДА.

В този експеримент реконструираният изход използва формула (4) и схемата от Фиг. 4. Резултатите от експеримента са представени на Фиг. 8. Те са организирани по същият начин както в раздел 6.3, като на Фиг. 8а е показан измереният изход (с непрекъснатата линия) и реконструираният изход (с линия от точки и тирета). Отново системата следва заданието дори и след настъпване на неизправността (в 55тата секунда). Получените резултати са подобни на тези получени при модификация на заданието.



Фигура 8. Реконструиране на изхода (а. - задание, б. - изходи и в. - моделни вероятности).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

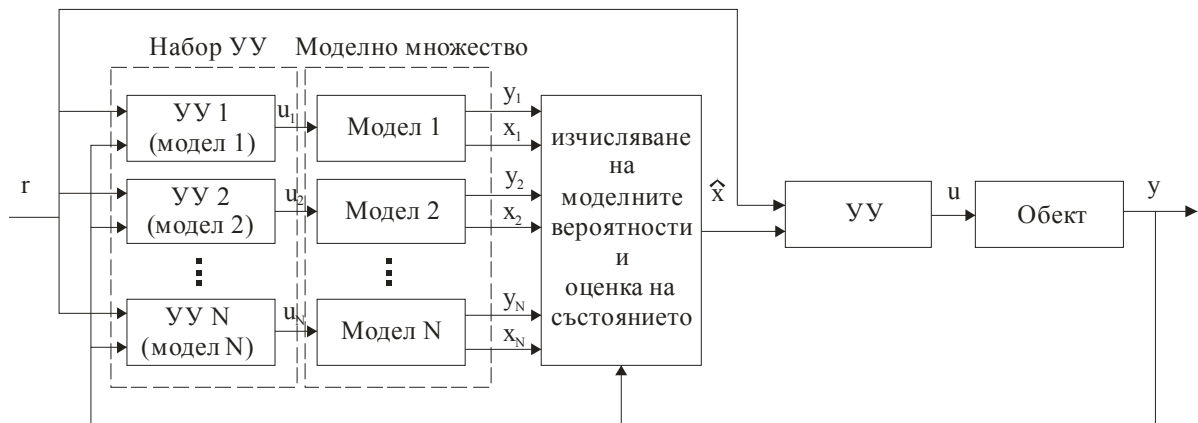
В тази статия е приложен многомоделен подход, в който се съчетават задачите за диагностика и за компенсации/управление при неизправности. Предимство на този подход е, че позволява да се откриват и компенсират частични или постепенно развиващи се неизправности. Подходът е работоспособен и при няколко едновременно възникващи или развиващи се неизправности. Предложена е формула и схема на затворена система, в която се извършва компенсация на неизправности чрез модификация на заданието. Нейното приложение е ефективно за едномерни системи. Предложена е и схема за компенсация на неизправности чрез реконструиране на изхода на обекта. Тази схема е приложима и за многомерни системи. Проведените експерименти върху едномерна система потвърждават работоспособността на предложения подход за компенсиране на вредният ефект от неизправностите.

БЛАГОДАРНОСТ

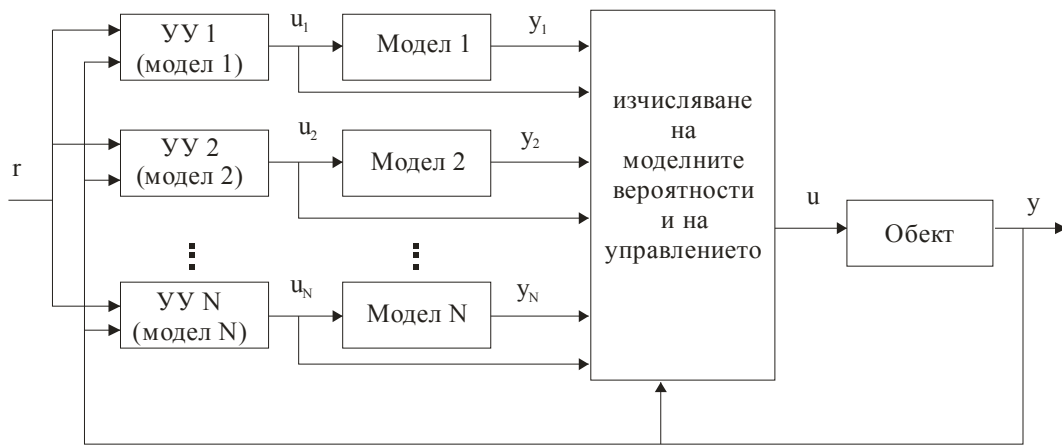
Изследванията в тази статия са извършени по проект 102ни046-08, финансиран от НИС на ТУ-София.

ЛИТЕРАТУРА

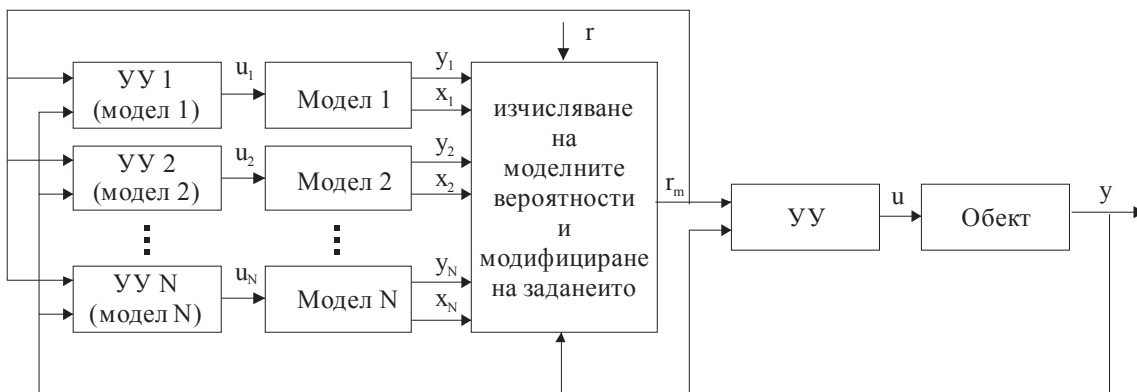
- [1] R. Isermann, Balle P Trends in the application of model-based fault detection and diagnostics in technical processes. *Control Engineering Practice*, 5 (5), pp 638-652, 1997.
- [2] S. Kanev and M. Verhaegen, "Controller reconfiguration for non-linear systems," *Control Engineering Practice*, vol. 8 (11), pp. 1223–1235, Nov. 2000.
- [3] Janos Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in engineering systems*, Marcel Dekker, Inc., USA, 1998.
- [4] P.S. Maybeck and P.D. Hanlon, "Performance enhancement of a multiple model adaptive estimator," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 1240–1254, Oct. 1995.
- [5] Puleva, T., Al. Ichtev. Adaptive multiple model algorithm for hydro generator speed and power control, *Slovak professional magazine for scientific and engineering issues AT&P journal PLUS*, N2, 2008, pp.1-6.
- [6] A. Ichtev, J. Hellendoorn, R. Babuška. Fault Detection and Isolation Using Multiple Takagi-Sugeno Fuzzy Models. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'01)*, Melbourne, Australia, pp.1498-1502.



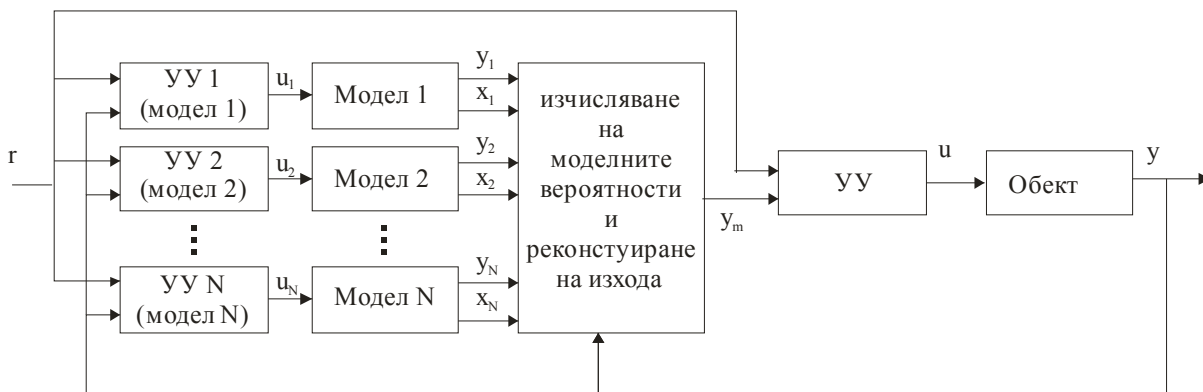
Фигура 1. Общ случай на много-моделно управление.



Фигура 2. Много-моделно управление с измерими състояния.



Фигура 3. Управление с модификация на задачите



Фигура 4 Управление с реконструиране на изходите