

N° d'ordre : 3065

ÉCOLE CENTRALE DE LILLE
UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

THESE

Présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

en

Productique : Automatique et Informatique Industrielle

par

Casimir Sié KAM

DOCTORAT DELIVRE CONJOINTEMENT PAR L'ÉCOLE CENTRALE DE LILLE
ET L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

LES BOND GRAPHS POUR LA MODELISATION DES SYSTEMES LINEAIRES INCERTAINS

Soutenue le 10 décembre 2001 devant le jury d'examen :

M. Jean Philippe CASSAR	<i>Président</i>	Professeur, U.S.T.L.
M. Wolfgang BORUTZKY	<i>Rapporteur</i>	Professeur, U. S. A. Bonn-Rhein-Sieg - Allemagne
M. Driss MEHDI	<i>Rapporteur</i>	Professeur, Université de Poitiers
Mme Geneviève DAUPHIN-TANGUY	<i>Directeur de thèse</i>	Professeur, E. C. Lille
M. Abderraman EL MHAMED	<i>Examineur</i>	Professeur, IUT de Montreuil
M. Franck GUILLEMARD	<i>Examineur</i>	Chef de service, PSA/DRIA
M. Ahmed RAHMANI	<i>Examineur</i>	Maître de Conférence, E. C. Lille

Thèse préparée dans le laboratoire LAIL de l'École Centrale de Lille sous la direction de Mme Geneviève DAUPHIN-TANGUY

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans la problématique relative à la modélisation des systèmes linéaires incertains pour l'étude de la sensibilité et de la robustesse des modèles aux incertitudes paramétriques.

La détermination de la fonction de sensibilité paramétrique y est abordée sous deux aspects : le premier porte sur l'application de la règle de Mason directement sur les modèles bond graphs pour la détermination sous forme formelle de la fonction de sensibilité paramétrique, le second propose une nouvelle modélisation des composants bond graphs en vue de simulations directement avec les logiciels bond graphs existants.

La détermination de la forme d'état canonique est traitée en considérant les incertitudes paramétriques comme étant des composants avec un sens physique, et des procédures graphiques pour sa détermination sont données.

La forme standard d'interconnexion utilisée dans le cadre de la μ -analyse et de la μ -synthèse, est déterminée à l'aide de procédures graphiques mises en œuvre après une nouvelle modélisation des composants bond graphs.

Enfin, les méthodes développées sont appliquées sur un exemple automobile.

Mots Clés

bond graph, Incertitudes paramétriques, sensibilité, robustesse, forme standard.

Bond graphs for linear uncertain systems modelling

Abstract

This PhD thesis concerns linear uncertain systems modelling for sensitivity and robustness analysis and synthesis with respect to the parametric.

The first part of the work deals with the parametric sensitivity function determination under two aspects. The first concerns Mason rule application on the bond graph models for the parametric sensitivity function determination under symbolic form, for an implementation in existing softwares. The second one, gives bond graph components modelling for the parametric sensitivity function simulation directly on the bond graph softwares.

A method based on a new modelling of parameter uncertainties as bond graph components with physical insight for canonical state equation determination is proposed. Graphical procedures are given to build directly on bond graph models the canonical state equation.

The standard interconnection form, used in μ -analysis and μ -synthesis, is treated graphically with a new modelling of the bond graph components.

Finally, an application of the methods on a vehicle suspension is done.

Key words

bond graph, parametric uncertainties, sensitivity, robustness, standard interconnection form.

Table des matières

Avant-Propos	1
Introduction générale	9
1 Représentation des systèmes dynamiques	13
1.1 Représentation des systèmes non perturbés	14
1.1.1 Matrice de transfert	14
1.1.2 Représentation d'état	15
1.1.3 Relation matrice de transfert et équation d'état	15
1.1.4 Transformation linéaire fractionnelle (LFT)	16
1.2 Représentation des systèmes incertains	18
1.2.1 Représentations fréquentielles des systèmes incertains	19
1.2.2 Représentation d'état des systèmes incertains	21
1.2.3 La forme standard	21
1.2.4 Sensibilité des systèmes	23
1.3 Stabilité et robustesse des systèmes incertains	24
1.3.1 Définitions	24
1.3.2 Théorème du petit gain	26
1.3.3 Robustesse aux incertitudes non structurées	26
1.3.4 Approche Algébrique de Kharitonov	27
1.3.5 Les méthodes graphiques pour les systèmes incertains	30
1.3.6 Conclusion	31
2 Sensibilité des modèles aux variations paramétriques	33
2.1 Introduction	33
2.2 Fonctions de Sensibilité	34
2.2.1 Sensibilité aux signaux	34
2.2.2 Sensibilité paramétrique	35
2.3 Fonction de sensibilité paramétrique	37
2.3.1 Première méthode	37
2.3.2 Deuxième méthode	49
2.3.3 Construction des modèles pseudo bond graphs de sensibilité	58
2.3.4 Exemple d'application 1 - modèle à paramètres indépendants	60

2.3.5	Exemple d'application 2 - Modèle avec des paramètres dépendants	65
2.3.6	Comparaison des deux méthodes	69
2.4	Conclusion	70
3	Introduction des incertitudes sur les éléments dans un modèle bond graph	73
3.1	Introduction	73
3.2	Modélisation bond graph des incertitudes paramétriques	73
3.2.1	Modélisation des composants 1-port	74
3.2.2	Causalité à affecter aux éléments 1-port	75
3.2.3	Composants jonction 2-ports	78
3.3	Equation d'état déduite du modèle bond graph	80
3.4	Généralisation	81
3.4.1	Détermination des matrices $A_0, \Delta A, B_0, \Delta B, C_0, \Delta C, D_0, \Delta D$	84
3.5	Interprétation graphique des résultats	85
3.5.1	Incertainces sur les éléments 1-port	86
3.5.2	Exemple	87
3.5.3	Incertainces sur les éléments de jonction TF et GY	91
3.6	Exemple d'incertitude sur un élément GY	92
3.7	Conclusion	96
4	Modèle pour l'étude de la robustesse des systèmes	97
4.1	Introduction	97
4.2	Synthèse des travaux sur la modélisation des incertitudes paramétriques	99
4.3	Vérification des propriétés sur les modèles bond graphs	102
4.4	Placement des entrées et sorties auxiliaires sur un bond graph	103
4.4.1	Élément R	104
4.4.2	Élément C en causalité intégrale	106
4.4.3	Élément I en causalité intégrale	106
4.4.4	Élément de Transformation	107
4.4.5	Élément Gyrateur	111
4.5	Détermination des sous-matrices de la matrice d'interconnexion	113
4.5.1	Détermination graphique des termes des sous-matrices	116
4.5.2	Présence de boucles résistives dans le modèle	119
4.6	Exemple	122
4.7	Conclusion	125
5	Exemple d'Application	127
5.1	Introduction	127
5.2	Problématique	127
5.3	Détermination des nouvelles valeurs des composants modifiés	129
5.3.1	Modification du centre de gravité	129
5.3.2	calcul de la nouvelle valeur de l'inertie	131

5.3.3	Nouvelles valeurs des composants touchés par la variation de la masse	131
5.4	Mise sous forme d'état canonique	132
5.5	Mise sous forme standard	135
5.6	Modèle de sensibilité	139
5.7	Conclusion	144
	Conclusion générale	147
	Annexe 1	149
	Annexe 2	155
	Annexe 3	163

Introduction générale

Depuis longtemps l'Homme s'attèle à faire exécuter avec le plus de précision et de fiabilité possible les tâches par les systèmes qu'il conçoit. Cette contrainte qui n'est pas aisée à satisfaire l'a conduit à chercher des méthodes pour prévoir les réactions et le comportement des systèmes face aux différents phénomènes perturbateurs tels que les influences du milieu environnant, les imperfections et l'usure des éléments le constituant. On entend par phénomène perturbateur aussi bien les signaux exogènes qui affectent le comportement du système (bruits...) que les variations paramétriques.

La notion de robustesse, comme de nombreuses méthodes pour l'étude des systèmes, fut à ses débuts une notion très mathématique avant d'évoluer vers l'analyse et la commande des systèmes. D'une manière générale, la robustesse pour un système commandé peut être définie comme une qualité qui décrit l'invariance ou la résistance du comportement d'un processus commandé à un certain nombre de phénomènes d'origine interne ou externe. Les exigences peuvent aussi porter sur la conservation du comportement nominal et être associées à d'autres propriétés telles que le découplage [Sueur and Dauphin-Tanguy, 1989] ou la rapidité de convergence de certaines variables [Alazard et al., 1999]. Ces objectifs de robustesse sont appelés, robustesse en stabilité et robustesse en performance.

L'automatique s'efforce d'exploiter les moyens d'action sur un système pour en maîtriser ou façonner le comportement. Cela commence par l'étude de la stabilité qui est une exigence critique dans la conception d'un système. Une perte de stabilité entraîne au mieux un comportement oscillatoire et donc une incapacité à réguler ou à poursuivre, au pire la génération de signaux de grande énergie qui vont endommager ou détruire le système. Outre la contrainte de stabilité, on recherche typiquement les meilleures performances possibles. Cette tâche est compliquée car d'une part, la conception s'effectue sur un modèle idéalisé du système et d'autre part, il faut assurer la robustesse aux imperfections de ce modèle.

La prise en compte des incertitudes paramétriques [Doyle, 1979] dans les modèles conduit à chercher des conditions garantissant la stabilité des modèles incertains, et à construire des lois de commande robustes par rapport aux variations paramétriques. Pour cela, deux types de modèles sont utilisés dans la littérature :

- le modèle d'état canonique [Xie et al., 1998], [Liu, 1997], [Gu et al., 1990], [Marsh and Wei, 1996] qui consiste à construire l'équation d'état classique des modèles tout en séparant les valeurs nominales des paramètres (dans des matrices nominales) et les incertitudes (dans des matrices incertaines) des modèles.

- la forme standard d'interconnexion qui se construit en séparant les valeurs nominales des paramètres des modèles dans une matrice dite augmentée, et toutes les incertitudes dans une matrice d'incertitudes appelée Δ [Doyle, 1982], [Morton, 1985], [Safonov, 1982].

Ces deux modèles incertains sont difficiles à construire du fait que pour le premier modèle, les matrices de l'équation d'état sont des fonctions non linéaires des paramètres du modèle, et pour le second modèle, en plus de certaines propriétés que le modèle doit respecter, la contrainte de diagonalité de la matrice Δ n'est pas aisée à satisfaire.

La méthodologie bond graph est un outil de modélisation permettant de matérialiser les transferts de puissance entre les entrées de commande d'un système et les sorties à commander. C'est un puissant outil d'analyse et d'aide à la conception des systèmes physiques.

L'un des premiers dans la littérature à traiter des systèmes incertains par la méthodologie bond graph est [Wilson and Eryilmaz, 1998]. D'autres auteurs tels que [Cabanellas et al., 1995] avec les pseudo bond graphs, [Gawthrop, 2000b] pour les bond graphs dits de sensibilité, [Borutzky and Granda, 2001] pour les bond graphs incrémentaux, utilisent l'outil bond graph pour l'étude de la sensibilité des modèles face aux variations paramétriques. Ces méthodes mises en oeuvre permettent la simulation des fonctions de sensibilité directement sur les modèles bond graphs mais ne tiennent toutefois pas compte des couplages entre les paramètres qui peuvent exister dans les modèles.

Notre travail, dans une première partie, donne une méthode efficace pour la détermination sous forme formelle de la fonction de sensibilité directement sur les modèles bond graphs. Dans un second temps, nous présentons une modélisation des compo-

sants bond graphs pour la détermination de la forme d'équation d'état canonique et en troisième partie, nous donnons une autre modélisation des composants bond graphs pour la détermination de la forme standard d'interconnexion avec le grand avantage de faciliter la vérification des propriétés directement sur le modèle bond graph.

Le mémoire est organisé en cinq parties de la façon suivante :

Nous commençons dans le premier chapitre par une présentation de quelques unes des méthodes les plus utilisées pour l'étude de la robustesse.

Dans le second chapitre, nous présentons deux méthodes pour l'étude de la sensibilité des systèmes face aux variations paramétriques.

La première méthode, ayant un objectif de mise en oeuvre logicielle, est basée sur l'application de la règle de Mason sur les modèles bond graphs afin de générer la fonction de sensibilité paramétrique sous forme formelle.

La seconde, plus axée vers la simulation directe sur les logiciels bond graphs existant requiert une modélisation des composants bond graphs et des variations sur les variables, dues aux incertitudes paramétriques.

Dans le troisième chapitre, nous abordons la détermination de la forme canonique de l'équation d'état des modèles utilisée par plusieurs méthodes mathématiques pour l'étude de la robustesse des systèmes. Dans cette partie, les incertitudes que nous introduisons sur les composants sont considérées comme des éléments physiques pour les éléments bond graphs.

Le quatrième chapitre est consacré à la détermination de la forme standard d'interconnexion initiée dans les années 1980 par Doyle et Safonov. Cette forme standard permet une vue complète et compacte du système, de ses perturbations et incertitudes et des objectifs ou de spécification de commandes. Cela nous a conduit à modéliser les composants bond graphs et à déterminer les procédures graphiques nécessaires à la détermination de cette forme standard.

Le cinquième chapitre porte sur l'application de nos travaux sur un exemple de suspension de véhicule.

L'annexe 1 présente un rappel sur les principes de base de la méthodologie bond graph, et les annexes 2 et 3 les détails de certaines de nos démonstrations.

Conclusion générale

Les bond graphs constituent un outil de modélisation des systèmes dynamiques complet puisqu'ils représentent à la fois la structure d'un système et les relations de cause à effet entre ses composants.

Tout au long de ce mémoire, après avoir présenté les systèmes incertains et les types d'incertitudes que l'on peut rencontrer dans la littérature, nous avons abordé l'étude de la sensibilité des modèles par rapport à leurs paramètres et présenté des procédures graphiques qui permettent de déterminer les formes mathématiques utilisées pour l'étude de la sensibilité et de la robustesse des systèmes.

La détermination de la sensibilité paramétrique des modèles a été abordée sous deux aspects [kam and Dauphin-Tanguy, 2001]. Le premier, par la détermination de la fonction de sensibilité paramétrique à l'aide de la règle de Mason appliquée sur le modèle bond graph a un objectif de mise en oeuvre logicielle. Le second aspect porte sur une modélisation des composants bond graphs pour une simulation directe sur les logiciels bond graphs existants. Les méthodes mises en oeuvre ont été étendues aux modèles comportant des couplages entre leurs paramètres. Les deux méthodes présentent le grand intérêt d'éviter au maximum le calcul manuel.

La détermination de l'équation d'état sous la forme canonique a été traitée en considérant les incertitudes sur les paramètres [Dauphin-Tanguy and Kam, 1999a] comme des composants physiques pour les éléments 1-port et de simples grandeurs algébriques pour les éléments 2-ports. Cette nouvelle modélisation des composants permet, par l'application des procédures graphiques proposées, de déterminer l'équation d'état canonique directement sur le modèle bond graph obtenu après substitution des composants incertains par leurs modèles équivalents. De nombreux algorithmes de détermination de la robustesse des modèles requièrent une forme particulière de décomposition des matrices incertaines de la forme d'état canonique, cela nous permet d'envisager dans quelles mesures nos travaux sur la forme d'état canonique pourraient satisfaire ce type de contrainte. Une étude comparative en collaboration avec le professeur Boruztky

[Borutzky et al.,] entre la forme d'état canonique basée sur des calculs de variation avec approximations au premier ordre des équations et la fonction de sensibilité paramétrique est en cours. Elle a pour but de montrer que les modèles utilisés pour l'étude de la sensibilité paramétrique et de la robustesse peuvent se rejoindre si l'on effectue des approximations judicieuses. Un article est en préparation sur ce sujet, et sera soumis pour cifa 2002.

Nous avons proposé une méthode [Kam and Dauphin-Tanguy, 2001] permettant de déterminer la forme standard d'interconnexion. L'utilisation de la méthodologie bond graph permet de vérifier graphiquement et aisément les propriétés que doivent respecter les modèles (propre, commandable et observable) avant d'être mis sous la forme standard. Des matrices dites de pondération sont utilisées dans la forme standard; nous avons considéré ici des matrices unité. Nous envisageons une extension vers des cas plus généraux.

Tout au long de ce mémoire, nous avons présenté des méthodes qui donnent des résultats sous forme d'expressions formelles [Kam and Dauphin-Tanguy,]. Toutefois les modèles mathématiques déduits du modèle bond graph peuvent sans grandes difficultés, être adaptés pour tout logiciel de simulation existant.

Les incertitudes non paramétriques (non structurées, aléatoires,...) ont une influence non négligeable sur les modèles, leur prise en compte serait une extension tout à fait intéressante. Nous n'avons considéré que les cas linéaires, une extension aux modèles non linéaires est envisagée.

Avant de clore ce mémoire, nous voudrions dire tout l'intérêt qu'à suscité chez nous l'utilisation de la méthodologie bond graph dans la génération des formes mathématiques utilisées pour l'étude des systèmes dynamiques linéaires incertains. Cela nous ouvre la voie pour son utilisation dans l'étude de la robustesse et des performances robustes des systèmes dynamiques...

Bibliographie

- [Alazard et al., 1999] Alazard, D., Cumer, C., Apkarian, P., Gauvrit, M., and Ferreres, G. (1999). *Robustesse et Commande Optimale*. Cépadues-Editions ISBN 2.85428.516.6.
- [Azmani, 1991] Azmani, A. (1991). Analyse qualitative d'un bond-graph par les techniques de l'intelligence artificielle. contribution à la conception et à la réalisation du logiciel d'aide à la modélisation archer. Master's thesis, Université des Sciences et Techniques de Lille, Thèse de Doctorat n° 836, France.
- [Borne et al., 1992] Borne, P., Dauphin-Tanguy, G., Richard, J., Rotella, F., and Zambettakis, I. (1992). *Modélisation et identification des processus*. Tome 2, Editions Technip.
- [Borutzky and Granda, 2001] Borutzky, W. and Granda, J. (2001). Determining sensitivities from an incremental true bond graph. *ICBGM 2001, Phoenix-USA*, pages 3–8.
- [Borutzky et al.,] Borutzky, W., Kam, S., C., and Dauphin-Tanguy, G. Modèles bond graphs pour l'étude de la sensibilité et de la robustesse - comparaison des deux approches". *soumis préparation pour CIFA 2002*.
- [Boyd et al., 1989] Boyd, S., P., Balakrishnan, V., and Kabamba, P. (1989). A bisection method for computing h_∞ norm of a transfer matrix and related problems. *Math. Cont. Signals and systems*, 2:207–220.
- [Cabanellas et al., 1995] Cabanellas, J. M., Félez, J., and Vera, C. (1995). A formulation of the sensitivity analysis for dynamic systems optimisation based on pseudo bond graph. *ICBGM 95*, pages 135–144.
- [Cadran, 1998] Cadran, E. (1998). Un outil de c.a.o. pour l'analyse symbolique des circuits électroniques analogiques. Master's thesis, INSA de Rennes N° D98-13.
- [Chilali, 1996] Chilali, M. and Gahinet, P. (1996). H_∞ design with pole placement constraints: an lmi approach. *IEEE Trans. Aut. Contr.*, 41(3):358–367.
- [Codron and Le Ballois, 1998] Codron, P. and Le Ballois, S. (1998). *Automatique: Systèmes linéaires et continus*. Dunod, Paris, ISBN 210 003826 5.

- [Dardenne, 1998] Dardenne, I. (1998). Développement de méthodologies pour la synthèse de lois de commande d'un avion de transport souple. Master's thesis, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronotique et de l'Espace.
- [Dauphin-Tanguy and Kam, 1999a] Dauphin-Tanguy, G. and Kam, S., C. (1999a). How to model parameter uncertainties in a bond graph framework. *WMC SCS, ESS'99, October, Erlangen, Germany*, pages 121–125.
- [Dauphin-Tanguy and Kam, 1999b] Dauphin-Tanguy, G. and Kam, C. S. (1999b). How to model parameter uncertainties in a bond graph frame work. *European Simulation Symposium*, 33:121–125.
- [Desoer and Vidyasagar, 1975] Desoer, C. and Vidyasagar, M. (1975). *Feedback Systems: Input-Output properties*. Academic Press, New York.
- [Director and Rohrer, 1968] Director, S. W. and Rohrer, R. A. (1968). On the efficient computation of first-order network sensitivities (for frequency domain studies of lumped, linear, time-invariant networks). *Second IFAC, System sensitivity and adaptivity, Dubrovnik, Yugoslavia*, pages B.54–B.69.
- [DiStephano et al., 1967] DiStephano, J., Allen, R., Stubberud, I., and J., W. (1967). *Theory and problems of feedback and control systems*. Shaum's Outline Series, McGraw-Hill Book Compagny.
- [Dorato, 1968] Dorato, P. (1968). Noise-intensity sensitivity in optimal stochastic systems. *Second IFAC, System sensitivity and adaptivity, Dubrovnik, Yugoslavia*, pages C.52–C.58.
- [Doyle, 1979] Doyle, J. C. (1979). Robustness of multiloop linear feedback systems. *17th IEEE CDC*, pages 12–19.
- [Doyle, 1982] Doyle, J. C. (1982). Analysis of feedback systems with structured uncertainties. *IEE Proceedings, part D*, 129(6):242–250.
- [Doyle, 1984] Doyle, J. C. (1984). Lecture notes. Master's thesis, ONR/Honeywell Workshop on Advances in Multipvariable Control, Mineapolis, Minn.
- [Doyle et al., 1989] Doyle, J. C., Glover, K., and Khargonekar, P., a. B. F. (1989). State space solutions to standard h_2 and h_∞ control problems. *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, AC-34:831–847.
- [Doyle et al., 1991] Doyle, J. C., Packard, A., and Khou, K. (1991). Review of lfts, lmis and \ddagger . *Proceedings of the 30th CDC IEEE Brighton England*.
- [Fan et al., 1991] Fan, M. K. H., Tits, A. L., and Doyle, J. C. (1991). Robustness in the presence of mixed parametric uncertainty and unmodeled dynamics. *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, 36(1):25–37.

- [Ferrerres, 1999] Ferrerres, G. (1999). A new upper bound for the skewed structured singular value. *Rapport scientifique (2), Département Commande des Systèmes et Dynamique du Vol, Toulouse*.
- [Frank, 1978] Frank, P. M. (1978). *Introduction to system sensitivity theory*. Academic press. New York.
- [Gawthrop, 2000a] Gawthrop, P., J. (2000a). Sensitivity bond graph. *Journal of the Franklin Institute*, 337(7):907–922.
- [Gawthrop and Ronco, 2000] Gawthrop, P. and Ronco, E. (2000). A sensitivity bond graph approach to estimation and control of mechatronic systems. *Control Engineering Practice*, 8(11):1237–148.
- [Gawthrop, 2000b] Gawthrop, P. J. (2000b). Estimation of mechatronic systems using sensitivity bond graphs. *IFAC, Daimstadt, Germany*, pages 893–897.
- [Gu et al., 1990] Gu, K., Zohdy, M. A., and Loh, N., K. (1990). Necessary and sufficient conditions of quadratic stability of uncertain systems. *IEEE Transaction on Automatic and Control*, 35(5):601–604.
- [Hsu, 1998] Hsu, K.-C. (1998). Variable structure control design for uncertain dynamic systems with sector nonlinearities. *Automatica*, 34(4):505–508.
- [Imai, 1997] Imai, H. (1997). Robust output regulation for linear systems with structured uncertainty. *Int. J. Control*, 6(4):499–515.
- [Kale and Tits, 2000] Kale, A. A. and Tits, A. L. (2000). On kharitonov’s theorem without invariant degree assumption. *Automatica*, 36:1075–1076.
- [Kam and Dauphin-Tanguy,] Kam, S., C. and Dauphin-Tanguy, G. Bond graph models of structured parameter uncertainties. *Soumis au Journal of the Franklin Institute*.
- [Kam and Dauphin-Tanguy, 2001] Kam, S., C. and Dauphin-Tanguy, G. (2001). Bond graph for standard interconnection structure determination. *ICBGM01, January , Phoenix-Arizona, USA*, pages 33–38.
- [kam and Dauphin-Tanguy, 2001] kam, S., C. and Dauphin-Tanguy, G. (2001). Sensitivity function determination on a bond graph model. *WMC SCS, ESS’01, October, Marseille, France*, pages 735–739.
- [Karnopp, 1977] Karnopp, D. (1977). Power and energy in linearized physical systems. *C. Bidard*, 303(1):85–97.
- [Karnopp and Rosenberg, 1975] Karnopp, D. and Rosenberg, R. (1975). *System dynamics: a unified approach*. by John Wiley Inc. pp 274.

- [Khargonekar et al., 1990] Khargonekar, P. P., Petersen, I. R., and Zhou, K. (1990). Robust stabilization of uncertain linear systems: quadratic stabilizability and h_{∞} control theory. *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, 35(3):356–361.
- [Kharitonov, 1978] Kharitonov, V. L. (1978). Asymptotic stability of an equilibrium position of a family of systems of linear differential equations. *Differential'nye Uravneniya*, 14:2086–2088.
- [Li, 1997] Li, G. (1997). On zero pole sensitivity of linear systems. *IEEE Transaction on circuit and systems-fundamental theory and applications*, 44(7):583–590.
- [Liu, 1997] Liu, G. (1997). Design of stable systems with uncertainties and constrained performance variation. *Int J. of control*, 67(1):23–32.
- [Marsh and Wei, 1996] Marsh, C. and Wei, H. (1996). Robustness bounds for systems with parametric uncertainty. *Automatica - London*, 32(10):1447–1454.
- [Middleton and Goowin, 1990] Middleton, H. and Goowin, R. (1990). *Digital control and estimation: a unified approach*. Prentice Hall, A division of Simon & Schuster, Englewood cliffs, New Jersey.
- [Morton, 1985] Morton, B. G. (1985). New application of μ to real-parameter variation problems. *Proceeding of the 24th Conference On Decision and Control*, pages 233–238.
- [Morton and MacAfoos, 1985] Morton, B. G. and MacAfoos, R. (1985). A μ -test for robustness analysis of a real parameter variation problem. *PAmerican conf 4th 1985*, pages 135–138.
- [Oustaloup, 1994] Oustaloup, A. (1994). *La robustesse*. Hermes ISBN 2.86601.442.1.
- [Packard and Doyle, 1993] Packard, A. and Doyle, J. C. (1993). The complex structured value. *Automatica*, 29(1):71–109.
- [Paynter, 1961] Paynter, H. (1961). *Analysis and Design of Engineering Systems*. M.I.T Press, Cambridge (Mass.).
- [Rahmani and Dauphin-Tanguy, 1998] Rahmani, A. and Dauphin-Tanguy, G. (1998). Symbolic determination of state matrices from bond graph model with derivative causality. *IEEE-SMC, IMACS Multiconference CESA '98, Nabeul-Hammamet, Tunisia, april 1-4*, pages 499–515.
- [Roe and Thomas, 2000] Roe, P., H. and Thomas, J., U. (2000). A new bond graph approach to sensitivity analysis. *MathMod*, pages 743–746.
- [Rosenberg and Karnopp, 1987] Rosenberg, R. C. and Karnopp, D. (1987). *Introduction to physical system dynamics*. McGraw-Hill Book company, ISBN 0-07-053905-7.
- [Safonov, 1982] Safonov, M. G. (1982). Stability margin for diagonally perturbed multivariable feedback systems. *IEE Proceedings*, 129 Part D(6):251–256.

- [Shyh et al., 1994] Shyh, J., Perng, M. F., Su, C. C., and Wang, C. K. (1994). Hierarchical techniques for symbolic analysis of large electronic circuits. *IEEE, ISCAS*, 1:21–24.
- [Soliman and K., 1968] Soliman, J. I. and K., K. A. (1968). Parameter variation in multivariable simplified-data systems. *Second IFAC, System sensitivity and adaptivity, Dubrovnik, Yugoslavia*, pages D.1–D.13.
- [Stoorvogel, 1993] Stoorvogel, A. A. (1993). The robust h_2 control problem : a worst-case design. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 28(9).
- [Sueur and Dauphin-Tanguy, 1989] Sueur, C. and Dauphin-Tanguy, G. (1989). Structural controllability / observability of linear systems represented by bond graphs. *Journal of the Franklin Institute*, 326(6):869–883.
- [Tomovic and Vukobratovic, 1968] Tomovic, R. and Vukobratovic, M. (1968). Contribution to the sensitivity of large systems. *Second IFAC, System sensitivity and adaptivity, Dubrovnik, Yugoslavia*, pages A.95–A.105.
- [Tomovic and Vukobratovic, 1972] Tomovic, R. and Vukobratovic, M. (1972). *General sensitivity theory*. Number 35. In Modern Analytic and computational methods in science and mathematics. Elsevier. New York.
- [Wilkie and Perkins, 1968] Wilkie, D. F. and Perkins, W. R. (1968). Essential parameters in sensitivity analysis. *Second IFAC, System sensitivity and adaptivity, Dubrovnik, Yugoslavia*, pages B.20–B.35.
- [Wilson and Eryilmaz, 1998] Wilson, B. and Eryilmaz, B. (1998). Using bond graphs to synthesize tree-structured transfer functions : Improved frequency-domain analysis of uncertain systems. *J. of Franklin Inst.*, 335(8):1443–1465.
- [Wilson and Eryilmaz, 1999] Wilson, B. and Eryilmaz, B. (1999). Bond graphs to facilitate robust analysis of an active suspension. *ICBGM99*, pages 217–222.
- [Xie and C., 1997] Xie, L. and C., S. Y. (1997). Robust control of systems with generalized positive real uncertainty. *Automatica*, 33(5):963–967.
- [Xie et al., 1998] Xie, S., Xie, L., and DE Souza, C. E. (1998). Robust dissipative control for linear systems with dissipative uncertainty. *Int J. Control*, 70(2):169–191.
- [Xu et al., 1998] Xu, S. J., Rachid, A., and Darouach, M. (1998). Robustness analysis of interval matrices based on kharitononv’s theorem. *IEEE Trans. on Aut. Contr.*, 43(2):273–278.
- [Yeung and Wang, 1987] Yeung, K. S. and Wang, S. S. (1987). A simple proof of kharitononv’s theorem. *IEEE Trans. On Aut. Contr.*, AC-32:577–579.
- [Young, 1997] Young, P. M. (1997). Robustness analysis with full-structured uncertainties. *Automatica*, 33(12):2131–2145.

- [Zames, 1966] Zames, G. (1966). On the input-output of non linear time-varying feedback systems. *Part I and II. IEEE Transaction on Automatic Control*, 11:228–238 and 465–476.