
Avant-propos

Les systèmes mécatroniques embarqués sont des systèmes où l'électronique et l'informatique sont intégrées dans des composants mécaniques en mouvement. Ces systèmes, qui répondent à des besoins d'intégration, de performances et de réduction de consommation, doivent être fiables. Ils doivent accomplir les fonctions requises dans les conditions d'emploi prévues et pendant des périodes de temps spécifiées. Les périodes de fonctionnement sans défaillances tendent à être de plus en plus longues. Les conditions d'emploi sont sévères. Les systèmes mécatroniques sont exposés à des atmosphères humides et à des contraintes thermiques, vibratoires, électriques et électromagnétiques. Ces contraintes, en se combinant, peuvent provoquer des défaillances de composants qui conduisent à des pannes.

Pour assurer le succès de leurs produits, les industriels de la mécatronique doivent vérifier que la conception est capable de résister à l'ensemble des contraintes environnementales et opérationnelles exercées et d'atteindre les niveaux de fiabilité exigés. Cet ouvrage présente une approche méthodologique d'amélioration de la fiabilité. Cette approche est basée sur l'expérimentation (mise en évidence des faiblesses de conception, caractérisation des effets des contraintes sur les composants), sur l'analyse de la défaillance (compréhension des mécanismes de défaillance), sur la modélisation des mécanismes de défaillance et sur la simulation de leurs effets sur la fiabilité. En prenant en compte la variabilité des conditions d'emploi et les incertitudes dues à la fabrication, la simulation fournit des prédictions de la fiabilité et améliore la conception en optimisant les facteurs d'ajustement de l'architecture.

Ce livre est le résultat de travaux de recherche partenariale entre des agents du secteur privé (grands groupes du secteur de la mécatronique, petites et moyennes entreprises) et des agents du secteur public (laboratoires d'universités ou d'écoles d'ingénieur).

Il s'adresse aux ingénieurs et chercheurs travaillant dans la filière de la mécatronique ainsi qu'aux étudiants de niveau master ou doctorants souhaitant se spécialiser dans le domaine de la mécatronique.

Ce volume est axé sur les essais et la modélisation multiphysique des défauts, qui permettent de révéler les faiblesses de conception et les mécanismes de défaillance et l'élaboration de métamodèles qui permettent d'optimiser la conception.

Le chapitre 1 décrit une méthodologie pour effectuer des essais hautement accélérés en environnement humide. Le principe est d'apporter de l'air humide sur le dispositif sous test (DST). L'aptitude de la chambre du HAT à faire varier très rapidement la température tout en appliquant des vibrations favorise la pénétration de l'humidité à l'intérieur du DST, plus particulièrement en cas de défaut d'étanchéité. En fonction de la température, cette humidité peut se trouver sous forme de vapeur ou de gel sur les cartes électroniques et révéler les faiblesses des assemblages ou des interconnexions et les défauts d'étanchéité. Les perturbations électromagnétiques sont aussi sources de défaillance. On vérifie les faiblesses de conception des circuits et des composants assurant la compatibilité électronique (CEM) en caractérisant les perturbations conduites et les émissions rayonnées avant et après essais hautement accélérés. Dans le chapitre 2, on décrit comment réaliser des essais de durée de vie de transistors de puissance hyperfréquence en conditions opérationnelles. L'originalité de ce banc d'essai est de suivre de manière automatisée la performance du composant sur des milliers d'heures tout en appliquant des contraintes électriques et thermiques. Le banc d'essai adresse des composants de forte puissance en régime pulsé et permet de suivre les dérives par des caractérisations électriques statiques et dynamiques *in situ*. On donne les résultats de durée de vie obtenus pour la technologie de transistors LDMOS de forte puissance. Le chapitre 3 présente les méthodologies de l'analyse de défaillance des systèmes mécatroniques. Les avantages et inconvénients des techniques d'ouverture des boîtiers résines et céramiques sont décrits ainsi que les précautions d'usage à respecter pour conserver l'intégrité fonctionnelle et structurale du composant. La technique de détection et de localisation de défauts par microscopie à émission de photons (PEM) est couplée à la technique OBIRCH pour orienter l'analyse et déterminer la cause de défaillance. Quatre cas d'étude d'analyse de défaillance sont présentés : un composant de puissance IGBT défectueux après essai, un transistor de commutation MOSFET endommagé par des essais sur le banc de contrainte de surtension électrique, un composant de technologie GaN endommagé après essai et un composant de tests LDMOS endommagé après essai. On présente les résultats des analyses permettant de localiser les défauts (analyse par rayon X, analyse électrique, analyse par microscopie optique, analyse thermique, analyse par émission de photons, analyse par microscopie électronique en transmission).

Le chapitre 4 concerne l'étude des phénomènes de transfert thermique liés à la dissipation de chaleur dans un module de puissance et de ses effets. Lors de

l'assemblage d'un module mécatronique, des défauts peuvent apparaître sous forme de lacunes au niveau du matériau d'interconnexion (MIC). En piégeant l'énergie thermique, ces défauts se transforment en sources potentielles de défaillance dans le module. L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence des défauts lacunaires sur la fiabilité en utilisant les paramètres température maximale de la puce et les contraintes thermomécaniques aux interfaces comme indicateurs. L'objectif principal du chapitre 5 est la modélisation par la méthode des éléments finis de cartes électroniques soumises à des sollicitations électriques, thermiques et vibratoires. On présente l'étude des comportements électrique, thermique et mécanique d'une structure mécatronique. Deux types de couplage des phénomènes physiques sont détaillés. Le premier est un couplage fort ; il utilise des éléments finis possédant tous les degrés de liberté nécessaires pour une étude électro-thermomécanique. Le second est un couplage faible ; il consiste à découpler les trois phénomènes physiques, avec un calcul séquentiel. On applique cette méthode sur deux applications. La première est une carte électronique d'une unité de contrôle moteur. La seconde est un amplificateur de puissance radar. La connaissance du comportement mécanique des cartes électroniques nécessite la modélisation de plusieurs phénomènes physiques. On présente une modélisation multiphysique qui considère les interdépendances et les interactions entre les différents phénomènes physiques : électriques, thermiques et vibratoires. Dans ce chapitre 6, on propose un ensemble de méthodes permettant d'optimiser des architectures de systèmes mécatroniques d'un point de vue fiabiliste. Cet ensemble de méthodes fait appel à des connaissances et compétences en modélisation déterministe et stochastique. L'objectif est d'associer la modélisation numérique par la méthode des éléments finis décrivant les comportements physiques du système mécatronique à un modèle stochastique du comportement. Les résultats de la modélisation numérique servent à construire un métamodèle par surface de réponse. En utilisant ce métamodèle on ajuste le niveau des facteurs de contrôle, on diminue la sensibilité du système mécatronique aux sources de variabilité (facteurs de bruits) et on accorde la réponse du système à sa cible (objectif).

Le chapitre 7 propose une démarche méthodologique basée sur les approches probabilistes permettant l'optimisation de la conception des systèmes mécatroniques embarqués avec la prise en compte de la nature inhérente des incertitudes. Ces incertitudes sont dues à la connaissance imparfaite des propriétés des matériaux et des dimensions géométriques et des fluctuations des chargements. L'optimisation déterministe ne tient pas compte des incertitudes et ne garantit pas une conception fiable. La démarche rationnelle de l'optimisation des systèmes embarqués consiste à considérer la propagation des incertitudes dans les comportements multiphysiques (électrique, thermique, mécanique, etc.) en s'appuyant sur une modélisation probabiliste des variabilités des paramètres d'entrée. L'optimisation fiabiliste est une approche qui vise de rechercher la meilleure conception qui vérifie le meilleur compromis entre la réduction de la fonction objectif (coûts, poids, etc.) et l'assurance de la fiabilité. Le chapitre 8 présente une étude de la fiabilité d'amplificateurs radiofréquence

de puissance à base de composants en nitrure de gallium pour des applications radar. L'étude porte sur la technologie de transistor à effet de champ à haute mobilité HEMT AlGaIn/GaN. Afin de déterminer les paramètres influents sur la fiabilité, on associe des caractérisations électriques, des tests de vieillissement et des analyses physiques. Les résultats montrent que la température est le paramètre déterminant du vieillissement et que le contact de grille est l'élément le plus sensible. On présente un modèle de composant intégrant la fiabilité dès la phase de conception des amplificateurs.

Remerciements

Nous tenons à remercier DGCIS, CR Haute-Normandie, CG95, CG91, CG78, CR Basse-Normandie, CR Ile-de-France, CA Cergy-Pontoise, Move'o et NAE pour le soutien au projet AUDACE.