

(19)



(11)

EP 2 208 209 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:

01.06.2016 Bulletin 2016/22

(51) Int Cl.:

H01F 7/20 (2006.01)

H01F 41/04 (2006.01)

(86) Numéro de dépôt international:

PCT/EP2008/064338

(21) Numéro de dépôt: **08841735.7**

(22) Date de dépôt: **23.10.2008**

(87) Numéro de publication internationale:

WO 2009/053420 (30.04.2009 Gazette 2009/18)

(54) **BOBINE APTE A GENERER UN CHAMP MAGNETIQUE ET PROCEDE DE FABRICATION DE LADITE BOBINE**

SPULE MIT DER FÄHIGKEIT ZUM ERZEUGEN EINES MAGNETFELDS UND VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG DER SPULE

COIL CAPABLE OF GENERATING A MAGNETIC FIELD AND METHOD OF MANUFACTURING SAID COIL

(84) Etats contractants désignés:

**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL NO PL PT
RO SE SI SK TR**

(30) Priorité: **24.10.2007 FR 0758541**

(43) Date de publication de la demande:
21.07.2010 Bulletin 2010/29

(73) Titulaire: **Centre National de la Recherche
Scientifique
(CNRS)
75016 Paris (FR)**

(72) Inventeurs:

• **DEBRAY, François
F-38120 Proveysieux (FR)**

• **PFISTER, Rolf**

F-38340 Voreppe (FR)

• **DUMAS, Jean**

F-38760 Varcès (FR)

• **TROPHIME, Christophe**

F-38950 Saint Martin Le Vinoux (FR)

• **VIDAL, Nadine**

F-38570 Hurtières (FR)

(74) Mandataire: **Regimbeau**

**139, rue Vendôme
69477 Lyon Cedex 06 (FR)**

(56) Documents cités:

EP-A- 0 146 494 FR-A- 2 892 524

US-A- 2 592 802 US-A- 3 427 710

US-A- 3 466 743

EP 2 208 209 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

[0001] La présente invention concerne une bobine apte à générer un champ magnétique particulièrement adaptée pour la génération de champs magnétiques intenses et/ou pour la tenue à des efforts mécaniques importants et un procédé de fabrication de ladite bobine.

[0002] Dans le domaine de la production des champs magnétiques, il est bien connu de générer un champ magnétique intense par des "aimants" constitués d'une ou plusieurs bobines traversées par un courant électrique intense, lesdites bobines étant refroidies.

[0003] Les dites bobines sont généralement constituées de tubes cylindriques obtenus dans un matériau conducteur ou supraconducteur et découpés suivant une ligne de découpe globalement hélicoïdale, à pas constant ou non, pour former des spires.

[0004] Ces bobines pour champs intenses sont actuellement presque exclusivement utilisées dans les laboratoires de champs magnétiques intenses et pourraient, par exemple, être utilisées utilement dans des machines de RMN selon l'acronyme « Résonance Magnétique Nucléaire » pour la réalisation d'imagerie par résonance magnétique.

[0005] Ces machines RMN présentent usuellement une structure du type tunnel avec un espace central réservé au patient et une structure annulaire qui intègre d'une part des moyens pour créer dans l'espace central d'observation un champ magnétique principal homogène et intense et d'autre part des moyens d'excitation radiofréquence et de traitement des signaux radiofréquence réémis par le corps du patient placé dans l'espace central d'observation, en réponse aux séquences d'excitation. Afin de différencier les signaux radiofréquence émis en réponse et créer une image, ces machines comportent également des bobines dites de gradient pour superposer au champ homogène intense des champs magnétiques additionnels dont la valeur dépend des coordonnées spatiales de leur lieu d'application.

[0006] Une telle machine RMN est par exemple décrite dans la demande de brevet français FR 2 892 524.

[0007] Les bobines de gradient de champs magnétiques ou générant un champ magnétique intense sont soumises à des forces électromagnétiques intenses qui induisent des efforts mécaniques conduisant à une déformation des spires de la bobine. La déformation des spires peut induire un manque de fiabilité de la machine et/ou une inhomogénéité du champ magnétique préjudiciable pour la réalisation d'imagerie de bonne qualité.

[0008] On connaît par ailleurs les documents US 2,592,802, EP 0146494 et US 3,466,743 qui décrivent des bobines d'induction.

[0009] Le document US 2,592,802 décrit une bobine d'induction constituée d'un tube obtenu dans un matériau conducteur et découpé suivant plusieurs lignes globalement hélicoïdales pour former des spires qui sont séparés par une portion verticale assurant une séparation entre les spires. Ladite partie de séparation est découpée

pour former une paire de membres d'espacement de part et d'autre d'un trou cylindrique dans lequel est avantageusement inséré une tige obtenue dans un matériau isolant.

[0010] Le document EP 0146494 décrit une bobine d'induction constituée de découpes annulaires incomplètes pratiquées dans un tube cylindrique, lesdites découpes annulaires incomplètes étant reliées par deux découpes verticales. Ce type de bobine d'induction est destiné à permettre le déplacement des espaceurs dans les réacteurs nucléaires et n'est pas destiné à recevoir des courants de haute intensité pour la formation de champs intenses.

[0011] Le document US 3,466,743 décrit une bobine constituée d'un tube obtenu dans un matériau conducteur et découpé suivant une ligne globalement hélicoïdale pour former des spires, lesdites spires passant par des trous initialement pratiqués le long du tube, la ligne de coupe étant remplie d'un matériau isolant afin de prévenir toute déformation lorsque la bobine est traversée par des courants de très hautes intensités.

[0012] Aucune des bobines décrites dans ces documents n'est destinée à la formation de champs dits intenses et ne permettent pas une reprise des efforts induits par les forces électromagnétiques sur les spires des bobines.

[0013] L'un des buts de l'invention est donc de remédier à tous ces inconvénients en proposant une bobine ou un ensemble de bobines aptes à générer un champ magnétique et particulièrement aptes à la génération d'un champ magnétique intense et un procédé de fabrication de ladite bobine de conception simple, peu onéreuse et procurant une reprise des efforts induits par les forces électromagnétiques sur les spires des bobines.

[0014] A cet effet et conformément à l'invention, il est proposé un procédé de fabrication d'une bobine apte à générer un champ magnétique dit champ intense lorsqu'il est traversé par un courant électrique comportant une étape de formation de spires dans un tube cylindrique remarquable en ce qu'il comporte au moins une étape de formation d'au moins un bossage sur au moins une spire de ladite bobine et d'au moins un creux de forme correspondante dans une spire adjacente de manière à ce que le bossage s'étende au droit dudit creux, permettant de reprendre les efforts mécaniques induits par les forces électromagnétiques et les forces mécaniques d'origine thermique.

[0015] Selon une caractéristique essentielle du procédé conforme à l'invention, ce dernier comporte une étape préalable d'optimisation du ou des bossages et du ou des creux.

[0016] Cette étape d'optimisation consiste au moins dans les étapes suivantes de :

- modélisation géométrique des tubes et des découpes définissant les spires,
- détermination d'un maillage des spires et du ou des bossages et du ou des creux correspondants à partir

- du modèle géométrique précédent,
- simulation des échauffements thermiques et/ou des champs électromagnétiques et/ou du comportement mécanique à partir du maillage,
- comparaison des échauffements thermiques et/ou des champs électromagnétiques et/ou des déformations mécaniques avec ceux d'un modèle dit de référence ne comportant pas de bossages.

[0017] Par ailleurs, les bossages successifs sur une spire donnée peuvent être avantageusement espacés angulairement pour optimiser la reprise des efforts électromagnétiques et éviter de trop grandes déformations de spires.

[0018] Lesdits bossages sont formés de telle sorte que la concavité de chaque bossage présente la même orientation.

[0019] Selon une variante d'exécution, les bossages sont formés de telle sorte que la concavité d'au moins un bossage présente une orientation opposée à l'orientation de la concavité d'au moins un second bossage.

[0020] Les spires, les bossages et les creux correspondants sont formés par une découpe d'un tube cylindrique suivant une ligne de coupe globalement hélicoïdale.

[0021] Par ailleurs, la largeur de chaque spire est constante ou variable.

[0022] De plus, un matériau isolant peut être déposé dans la ligne de découpe entre deux spires consécutives.

[0023] Un autre objet de l'invention concerne une bobine ou un ensemble de bobines aptes à générer un champ magnétique dit champ intense lorsqu'elle(s) est (sont) traversée(s) par un courant électrique, ladite bobine étant constituée d'au moins un tube ou d'un ensemble de tube obtenu dans un matériau conducteur et/ou supraconducteur et découpée suivant une ligne globalement hélicoïdale, remarquable en ce qu'au moins une spire de la bobine comporte au moins un bossage s'étendant au droit d'un creux formé dans une spire adjacente permettant de reprendre les efforts mécaniques induits par les couples électromagnétiques sur les spires.

[0024] De manière avantageuse, les bossages successifs sur une spire sont décalés angulairement pour optimiser la reprise des efforts électromagnétiques et éviter de trop grandes déformations de spires.

[0025] Ladite bobine comporte une pluralité de bossages et de creux dont la concavité est orientée dans une même direction.

[0026] Selon une variante d'exécution, ladite bobine comporte une pluralité de bossages et de creux et en ce que la concavité d'au moins un bossage présente une orientation opposée à l'orientation de la concavité d'au moins un second bossage.

[0027] Chaque bossage présente par exemple une forme générale hémicirculaire ou triangulaire ou carrée ou rectangulaire.

[0028] Par ailleurs, la largeur de chaque spire est constante ou variable.

[0029] De plus, ladite bobine comporte un matériau isolant comblant la ligne de découpe.

[0030] Ladite bobine est obtenue soit dans un tube cylindrique en matériaux électriquement conducteur soit dans un matériau supraconducteur.

[0031] D'autres avantages et caractéristiques ressortiront mieux de la description qui va suivre de plusieurs variantes d'exécution, données à titre d'exemples non limitatifs, une bobine apte à générer un champ magnétique et particulièrement aptes à la génération d'un champ magnétique intense et un procédé de fabrication de ladite bobine conforme à l'invention, à partir des dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est vue en perspective d'une bobine conforme à l'invention,
- la figure 2 est une vue en perspective d'une variante d'exécution de la bobine conforme à l'invention,
- la figure 3 est une vue en perspective partielle d'une bobine conforme à l'invention,
- la figure 4 est une vue en perspective d'un détail de la bobine conforme à l'invention représentée sur la figure 3 avant compression des plaques d'isolant,
- la figure 5 est une vue en perspective d'un détail de la bobine conforme à l'invention représentée sur la figure 3 après compression des plaques d'isolant,
- la figure 6 est un diagramme représentant les étapes de fabrication d'une bobine conforme à l'invention

[0032] En référence à la figure 1, la bobine 1 consiste en un tube 2 globalement cylindrique dans lequel des spires 3 ont été formées par une découpe, par tout moyen approprié, d'une ligne de découpe hélicoïdale 4, ledit tube 2 étant obtenu dans un matériau électriquement conducteur tel que du cuivre ou un supraconducteur massif par exemple et ladite bobine comportant éventuellement un matériau isolant comblant la ligne de découpe 4 de manière bien connue par l'Homme du Métier.

[0033] La découpe hélicoïdale 4 est obtenue suivant les équations paramétriques dans un système cartésien orthonormé ou l'axe Oz est confondu avec l'axe de révolution du tube 2 :

$$x = R \cos t, \quad y = R \sin t, \quad z = kt \quad \text{où } k \text{ désigne une constante donnée strictement positive. } R \text{ et } t \text{ correspondent aux coordonnées cylindriques dans un plan } OXOy.$$

[0034] Une pluralité de spires 3 de la bobine 1 comporte un bossage 5 s'étendant au droit d'un creux 6 de forme correspondante formé dans une spire 3 adjacente permettant de reprendre les efforts mécaniques induits par les couples électromagnétiques sur les spires 3 lorsqu'elles sont traversées par un courant de forte intensité.

[0035] Dans cet exemple particulier de réalisation, tous les bossages 5 et les creux 6 des spires 3 sont globalement alignés le long d'une droite longitudinale.

[0036] Néanmoins, il est bien évident que les bossages

5 de deux spires adjacentes pourront être décalés angulairement.

[0037] La partie supérieure de la bobine 1, arbitrairement représentée verticalement sur la figure 1, comporte une pluralité de bossages 5 et de creux 6 dont la concavité est orientée dans une même direction, vers l'extrémité inférieure de ladite bobine 1.

[0038] Par ailleurs, la partie inférieure de la bobine 1 comporte également une pluralité de bossages 5 et de creux 6 dont la concavité est orientée dans une même direction, par exemple vers l'extrémité supérieure de ladite bobine 1, opposée à la direction à l'orientation de la concavité des bossages 5 des spires 3 de la partie supérieure de ladite bobine.

[0039] Il va de soi que la bobine 1 pourra ne comprendre qu'un seul bossage et un seul creux ou une pluralité de bossages et de creux sur une ou plusieurs spires, la concavité d'au moins un bossage pouvant présenter une orientation opposée à l'orientation de la concavité d'au moins un second bossage, sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

[0040] Dans cet exemple de réalisation, chaque bossage 5, et par conséquent chaque creux 6, présente une forme générale hémicirculaire ; toutefois, il est bien évident que chaque bossage 5 pourra présenter une forme quelconque telle qu'une forme triangulaire, carrée ou rectangulaire par exemple.

[0041] Par ailleurs, dans cet exemple particulier de réalisation, la largeur de chaque spire 3 est constante ; toutefois, la largeur de tout ou partie des spires pourra être variable, la largeur de l'espace séparant deux spires adjacentes étant constante y compris au niveau des bossages 5 et des creux 6.

[0042] De plus, la bobine pourra être constituée d'une pluralité de tubes 2 sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

[0043] Selon une variante d'exécution de la bobine conforme à l'invention, en référence à la figure 2, cette dernière est constituée de la même manière que précédemment d'un tube 2 globalement cylindrique dans lequel des spires 3 ont été formées par découpe suivant une ligne de découpe hélicoïdale 4.

[0044] La découpe hélicoïdale 4 est obtenue suivant les équations paramétriques dans un système orthonormé où l'axe Oz est confondu avec l'axe de révolution du tube 2 :

$$x = R \cos f(t), y = R \sin f(t), z = k g(t) \text{ où } R \text{ et } k \text{ sont des constantes données strictement positives.}$$

[0045] On notera que $f(t)$ pourra être substituée par $f(t, \theta)$ pour régler l'angle de la découpe suivant Oz dans un plan radial. Les bossages 5 et les creux 6 présenteront alors une forme globalement conique, c'est-à-dire que leurs bords ne seront pas perpendiculaires à l'axe de révolution du tube 2.

[0046] La fonction $g(t)$ est de préférence une fonction trigonométrique de la forme par exemple : $x = R \cos(t)$,

$$y = R \sin(t)$$

$$z = t/(2\pi) * (1 + a * \cos(4t))$$

[0047] Ainsi, la découpe hélicoïdale 4 forme des bossages 5 et des creux 6 dans les spires 3 par rapport à une découpe hélicoïdale de référence obtenue selon les équations paramétriques :

$$x = R \cos t, y = R \sin t, z = kt \text{ où } k \text{ est une constante donnée strictement positive.}$$

[0048] On entend ici par bossage une partie saillante d'une spire 3 par rapport à une spire obtenue par une ligne de découpe hélicoïdale de référence.

[0049] Selon une autre variante d'exécution la bobine conforme à l'invention, en référence à la figure 3, cette dernière est constituée de la même manière que précédemment d'un tube 2 globalement cylindrique dans lequel des spires 3 ont été formées par découpe suivant une ligne de découpe globalement hélicoïdale 4, lesdites spires comportant des bossages 5 et des creux 6 de formes correspondantes. Lesdits bossages 5 et lesdits creux 6 présentent une forme trapézoïdale.

[0050] La section des bossages 5 et des creux 6 peut décroître depuis la paroi extérieure vers la paroi intérieure du tube 3.

[0051] Cette forme de bossages et de creux est particulièrement adaptée pour la mise en oeuvre de spires fines et/ou pour le calage d'isolant.

[0052] De plus, on notera que cette technique peut s'appliquer au design de bobines à densité de courant non uniforme.

[0053] Par ailleurs, en référence à la figure 4, des plaques d'isolant telles que des plaques de fibre de verre pré-imprégnée dites « pre-preg », selon l'acronyme aglosaxon « pre-impregnated » ; lesdites plaques présentant une forme de section annulaire, peuvent être positionnées entre deux spires 3 adjacentes. Afin de permettre l'introduction de ces plaques d'isolant 7, les spires 3 sont écartées par tous moyens appropriés (figure 4). Ces plaques d'isolant 7 sont avantageusement constituées d'au moins 3 feuilles fines d'isolant 8 superposées. De cette manière, l'isolant une fois comprimé, en référence à la figure 5, se conforme au dessin de la spire 3 sans casser. En effet, cette superposition de feuilles fines d'isolant 8 procure une diminution des contraintes internes à l'isolant. Par ailleurs, la feuille intermédiaire 8 n'est jamais en contact direct avec le métal ou le matériau supraconducteur des spires 3 assurant ainsi une sécurité électrique accrue.

[0054] Il est bien évident que les plaques d'isolant 7 pourront comprendre un nombre quelconque de feuilles 8 et qu'elles pourront être obtenues dans un matériau isolant quelconque sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

[0055] On observera que le calage de plaques d'isolants entre des bossages 5 et des creux 6 successifs peut permettre le passage de liquide de refroidissement au niveau desdits bossages 5 et desdits creux 6 (figure 5), la bobine 2 qui ne comporte pas d'isolant au niveau des bossages 5 et des creux 6 comportant des jours 9 permettant une circulation d'un liquide ou d'un fluide de refroidissement entre l'intérieur et l'extérieur du tube et inversement. Ledit liquide de refroidissement consistant par exemple dans de l'eau dans le cas d'aimants résistifs, ou dans de l'hélium ou de l'azote liquide dans le cas des matériaux supraconducteurs.

[0056] On expliquera maintenant le procédé de fabrication d'une bobine conforme à l'invention, en référence à la figure 6.

[0057] Dans une première étape 100, un modèle géométrique des spires est réalisé à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) tel que CATIA® ou Open Cascade commercialisé par la société Open Cascade SAS. Un maillage des spires 3 et du ou des bossages 5 et du ou des creux 6 correspondants est réalisé, dans une étape 200, à partir du modèle CAO au moyen d'un logiciel adapté tel que, par exemple, le logiciel CATIA® ou un mailleur Ghs3d® de la société Distène, puis dans une étape 300, une simulation des échauffements thermiques et/ou des champs électromagnétiques et/ou du comportement mécanique correspondant au précédent maillage est réalisée.

[0058] Lesdits échauffements thermiques et/ou les champs électromagnétiques et/ou des déformations mécaniques obtenus par ce maillage sont comparés, dans une étape 400, avec un modèle dit de référence ne comportant pas de bossages et de creux. Des modifications peuvent être effectuées si nécessaire sur la géométrie des spires. La procédure est alors répétée jusqu'à obtenir un modèle adapté.

[0059] La même procédure peut être utilisée pour l'optimisation des contraintes mécaniques.

[0060] Les étapes 100 à 400 sont alors réitérés jusqu'à l'obtention d'un maillage présentant un échauffement thermique minimal et/ ou un champ magnétique homogène ou quasi homogène et/ou une minimisation des déplacements consécutifs aux chargements électromagnétiques et thermiques.

[0061] La courbe paramétrée correspondant à la découpe retenu ainsi déterminé est alors transmise à une machine de découpe numérique, qui procède à la découpe des spires 3, des bossages 5 et des creux 6 dans le tube 2, dans une étape 500.

[0062] On observera que préalablement à l'étape de maillage 100, une étape de détermination du nombre de spires, de la largeur des spires et des dimensions du tube dont sa longueur, son épaisseur et son diamètre externe est opérée conformément aux enseignement de la publication « Magnet Calculations at the Grenoble High Magnetic Field Laboratory », Christophe Trophime, Konstantin Egorov, François Debray, Walter Joss and Guy Aubert, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SU-

PERCONDUCTIVITY. VOL. 12, NO 1, MARCH 2002.

[0063] Par ailleurs, on observera que les bossages 5 et les creux 6 coopèrent pour assurer un centrage des spires.

[0064] Il va de soi que le tube 2 pourra consister en un ensemble de tubes, ledit tube 2 ou l'ensemble de tubes étant obtenu dans un matériau conducteur et/ou supraconducteur massif. Alternativement, le tube 2 pourra consister en un tube support obtenu dans du cuivre ou de l'inox par exemple et sur lequel son solidarités, par soudure par exemple, des fils ou des câbles supraconducteurs. Le tube support muni des bossages 5 et des creux 6 conformes à l'invention a alors une fonction de reprise des efforts électromagnétiques et une fonction de dissipation thermique en cas de "quench", c'est-à-dire de retour à l'état normal accidentel ou non de la partie supraconductrice.

[0065] Enfin, il est bien évident que les bobines décrites précédemment pourront trouver de nombreuses applications dans les domaines de la génération de champs magnétiques à des fins expérimentales, ou de l'imagerie à résonance magnétique nucléaire par exemple, et que les exemples que l'on vient de donner ne sont que des illustrations particulières en aucun cas limitatives quant aux domaines d'application de l'invention.

Revendications

1. Procédé de fabrication d'une bobine apte à générer un champ magnétique dit champ intense lorsqu'elle est traversée par un courant électrique comportant une étape de formation de spires (3) dans un tube cylindrique effectuée par découpe suivant une ligne de découpe (4) globalement hélicoïdale, **caractérisé en ce que** la ligne découpe globalement hélicoïdale (4) forme au moins un bossage (5) sur au moins une spire (3) de ladite bobine et au moins un creux (6) de forme correspondante dans une spire adjacente de manière à ce que le bossage (5) s'étende au droit dudit creux (6), permettant de reprendre les efforts mécaniques induits par les forces électromagnétiques et les forces mécaniques d'origine thermique.
2. Procédé selon la revendication précédente **caractérisé en ce qu'il** comporte une étape préalable d'optimisation du ou des bossages (5) et du ou des creux (6).
3. Procédé selon la revendication 2 **caractérisé en ce que** l'étape d'optimisation consiste au moins dans les étapes suivantes de :
 - détermination (200) d'un maillage des spires et du ou des bossages et du ou des creux correspondants,
 - simulation (300) des échauffements thermi-

- ques et/ou des champs électromagnétiques à partir du maillage,
- comparaison (400) des échauffements thermiques et/ou des champs électromagnétiques avec ceux d'un maillage dit de référence ne comportant pas de bossages. 5
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 **caractérisé en ce que** les bossages sont formés de telle sorte que la concavité de chaque bossage présente la même orientation. 10
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 **caractérisé en ce que** les bossages sont formés de telle sorte que la concavité d'au moins un bossage présente une orientation opposée à l'orientation de la concavité d'au moins un second bossage. 25
7. Procédé selon la revendication 1 **caractérisé en ce que** la largeur de chaque spire est constante. 30
8. Procédé selon la revendication 1 **caractérisé en ce que** la largeur de chaque spire est variable. 35
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 **caractérisé en ce qu'un** matériau isolant est déposé dans la ligne de découpe entre 2 spires consécutives. 40
10. Bobine apte à générer un champ magnétique dit champ intense lorsqu'elle est traversée par un courant électrique, ladite bobine (1) étant constituée d'au moins d'un tube (2) ou d'un ensemble de tube obtenu dans un matériau conducteur et/ou supraconducteur et découpé suivant une ligne de découpe globalement hélicoïdale (4) pour former des spires (3), **caractérisée en ce qu'au moins** une spire (3) de la bobine (1) comporte au moins un bossage (5) s'étendant au droit d'un creux (6) de forme correspondante formé dans une spire (3) adjacente, le bossage et le creux correspondant étant formés par la ligne de découpe et permettant de reprendre les efforts mécaniques induits par les forces électromagnétiques sur les spires (3). 45
11. Bobine selon la revendication 10 **caractérisée en ce que** les bossages (5) adjacent d'une spire (3) sont décalés angulairement. 50
12. Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 ou 11 **caractérisée en ce qu'elle** comporte une pluralité de bossages (5) et de creux (6) dont la concavité est orientée dans une même direction. 55
13. Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 ou 11 **caractérisée en ce qu'elle** comporte une pluralité de bossages (5) et de creux (6) et **en ce que** la concavité d'au moins un bossage (5) présente une orientation opposée à l'orientation de la concavité d'au moins un second bossage (5).
14. Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 à 13 **caractérisée en ce que** chaque bossage (5) présente une forme générale hémicirculaire ou triangulaire ou carrée ou rectangulaire.
15. Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 à 14 **caractérisée en ce que** la largeur de chaque spire (3) est constante.
16. Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 à 14 **caractérisée en ce que** la largeur de chaque spire (3) est variable.
17. Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 à 16 **caractérisée en ce qu'elle** comporte un matériau isolant comblant la ligne de découpe (4).
18. Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 à 17 **caractérisée en ce qu'elle** est obtenue dans un tube (2) cylindrique en matériaux conducteur.
19. Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 à 17 **caractérisée en ce qu'elle** est obtenue dans un matériau supraconducteur massif.
20. Application de la bobine suivant l'une quelconque des revendications 10 à 19 à un aimant pour champ intense ou homogène.
21. Application de la bobine suivant l'une quelconque des revendications 10 à 19 à une bobine de gradient solénoïdale d'une machine à résonance magnétique nucléaire.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer Spule, die imstande ist, ein intensives Magnetfeld zu erzeugen, wenn sie von einem elektrischen Strom durchquert wird, aufweisend einen Bildungsschritt von Windungen (3) in einem zylindrischen Rohr, durchgeführt durch Schneiden gemäß einer allgemein schraubenförmigen Schnittlinie (4), **dadurch gekennzeichnet, dass** die allgemein schraubenförmige Schnittlinie (4) mindestens eine Wulst (5) auf mindestens einer

- Windung (3) der Spule und mindestens eine Austiefung (6) entsprechender Form in einer benachbarten Windung derart bildet, dass sich die Wulst (5) senkrecht zur Austiefung (6) erstreckt, wodurch ermöglicht wird, die von den elektromagnetischen Kräften und den mechanischen Kräften thermischen Ursprungs induzierten mechanischen Kräfte zu übernehmen.
2. Verfahren nach vorangehendem Anspruch, **dadurch gekennzeichnet, dass** es einen vorherigen Optimierungsschritt der Wulst/Wülste (5) und der Austiefung/en (6) aufweist. 10
 3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Optimierungsschritt mindestens aus den folgenden Schritten besteht: 15
 - Bestimmen (200) eines Netzwerks der Windungen und der entsprechenden Wulst/Wülste und der Austiefung/en, 20
 - Simulieren (300) der thermischen Erwärmungen und/oder der elektromagnetischen Felder ausgehend vom Netzwerk,
 - Vergleichen (400) der thermischen Erwärmungen und/oder der elektromagnetischen Felder mit denen eines Referenznetzwerks ohne Wülste, 25
 - Vergleichen (400) der Verlagerungen unter den elektromagnetischen und thermischen Ladungen der Windungen mit denen eines Referenzmodells ohne Wülste. 30
 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Wülste von zwei benachbarten Windungen winklig beabstandet sind. 35
 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Wülste derart geformt sind, dass die Konkavität jeder Wulst die gleiche Richtung aufweist. 40
 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Wülste derart geformt sind, dass die Konkavität mindestens einer Wulst eine Richtung aufweist, die zur Richtung der Konkavität mindestens einer zweiten Wulst entgegengesetzt ist. 45
 7. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Breite jeder Windung konstant ist. 50
 8. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Breite jeder Windung variabel ist. 55
 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** in die Schnittlinie zwischen zwei aufeinanderfolgenden Windungen ein Isolationsmaterial eingebracht ist.
 10. Spule, die imstande ist, ein intensives Magnetfeld zu erzeugen, wenn sie von einem elektrischen Strom durchquert wird, wobei die Spule (1) von mindestens einem Rohr (2) oder einer Rohreinheit gebildet ist, hergestellt aus einem leitenden und/oder supraleitenden Material und geschnitten gemäß einer allgemein schraubenförmigen Schnittlinie (4), um Windungen (3) zu bilden, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens eine Windung (3) der Spule (1) mindestens eine Wulst (5) aufweist, die sich senkrecht zu einer entsprechend geformten Austiefung (6) erstreckt, die in einer benachbarten Windung (3) ausgebildet ist, wobei die Wulst und die entsprechende Austiefung von der Schnittlinie gebildet sind und erlauben, die von den elektromagnetischen Kräften auf die Windungen (3) induzierten mechanischen Kräfte zu übernehmen.
 11. Spule nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die benachbarten Wülste (5) einer Windung (3) winklig versetzt sind.
 12. Spule nach einem der Ansprüche 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie eine Vielzahl von Wülsten (5) und Austiefungen (6) aufweist, deren Konkavität in eine selbe Richtung zeigt.
 13. Spule nach einem der Ansprüche 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie eine Vielzahl von Wülsten (5) und Austiefungen (6) aufweist und dass die Konkavität mindestens einer Wulst (5) eine Richtung aufweist, die zur Richtung der Konkavität mindestens einer zweiten Wulst (5) entgegengesetzt ist.
 14. Spule nach einem der Ansprüche 10 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** jede Wulst (5) eine allgemein halbkreisförmige oder dreieckige oder quadratische oder rechteckige Form aufweist.
 15. Spule nach einem der Ansprüche 10 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Breite jeder Windung (3) konstant ist.
 16. Spule nach einem der Ansprüche 10 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Breite jeder Windung (3) variabel ist.
 17. Spule nach einem der Ansprüche 10 bis 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie ein Isolationsmaterial aufweist, welches die Schnittlinie (4) füllt.
 18. Spule nach einem der Ansprüche 10 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie aus einem zylindrischen Rohr (2) aus leitendem Material hergestellt ist.

19. Spule nach einem der Ansprüche 10 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie aus einem massiven supraleitenden Material hergestellt ist.
20. Applikation der Spule nach einem der Ansprüche 10 bis 19 an einen Magneten für intensives oder homogenes Feld.
21. Applikation der Spule nach einem der Ansprüche 10 bis 19 an eine Solenoidal-Gradientenspule einer nuklearen Magnetresonanztomographie-Maschine.

Claims

1. A method for manufacturing a coil capable of generating a magnetic field known as intense field when an electric current passes through it, comprising a step of formation of turns (3) in a cylindrical tube formed by cutting out along an overall helicoidal cutting line (4), **characterized in that** the overall helicoidal cutting line (4) forms at least one boss (5) on at least one turn (3) of said coil and at least one recess (6) of corresponding form in an adjacent turn such that the boss (5) extends perpendicularly to said recess (6), for absorbing the mechanical stresses caused by the electromagnetic forces and the mechanical forces of thermal origin.
2. The method according to the preceding claim, **characterized in that** it comprises a prior optimisation step of the boss or bosses (5) and of the recess or recesses (6).
3. The method according to claim 2, **characterized in that** the optimisation step consists at least in the following steps of:
 - determination (200) of a meshing of the turns and the boss or bosses and the corresponding recess or recesses,
 - simulation (300) of the temperature rises and/or the electromagnetic fields from the meshing,
 - comparison (400) of the temperature rises and/or of the electromagnetic fields with those of a reference meshing having no bosses,
 - comparison (400) of the displacements under the electromagnetic and thermal loads of the turns with those of a reference model having no bosses.
4. The method according to any one of claims 1 to 3, **characterized in that** the bosses of two adjacent turns are spaced angularly.
5. The method according to any one of claims 1 to 4, **characterized in that** the bosses are formed such

that the concavity of each boss has the same orientation.

6. The method according to any one of claims 1 to 4, **characterized in that** the bosses are formed such that the concavity of at least one boss has an orientation opposite the orientation of the concavity of at least one second boss.
7. The method according to claim 1, **characterized in that** the width of each turn is constant.
8. The method according to claim 1, **characterized in that** the width of each turn is variable.
9. The method according to any one of claims 1 to 8, **characterized in that** an insulating material is deposited in the cut-out line between two consecutive turns.
10. A coil capable of generating a magnetic field known as intense field when an electric current passes through it, said coil (1) consisting of at least one tube (2) or a tubes assembly made of a conductive and/or superconducting material and cut out along an overall helicoidal cut-out line (4) to form turns (3), **characterized in that** at least one turn (3) of the coil (1) comprises at least one boss (5) extending perpendicularly to a recess (6) of a corresponding form formed in an adjacent turn (3), the boss and the corresponding recess being formed by the cut-out line and for absorbing the mechanical stresses caused by the electromagnetic forces on the turns (3).
11. The coil according to claim 10, **characterized in that** adjacent bosses (5) of a turn (3) are offset angularly.
12. The coil according to any one of claims 10 or 11, **characterized in that** it comprises a plurality of bosses (5) and recesses (6) whereof the concavity is oriented in the same direction.
13. The coil according to any one of claims 10 or 11, **characterized in that** it comprises a plurality of bosses (5) and recesses (6) and **in that** the concavity of at least one boss (5) has an orientation opposite the orientation of the concavity of at least one second boss (5).
14. The coil according to any one of claims 10 to 13, **characterized in that** each boss (5) has a general semicircular or triangular or square or rectangular form.
15. The coil according to any one of claims 10 to 14, **characterized in that** the width of each turn (3) is constant.

16. The coil according to any one of claims 10 to 14,
characterized in that the width of each turn (3) is
variable.
17. The coil according to any one of claims 10 to 16, ⁵
characterized in that it comprises insulating mate-
rial covering the cut-out line (4).
18. The coil according to any one of claims 10 to 17,
characterized in that it is made from a cylindrical ¹⁰
tube (2) of conductive materials.
19. The coil according to any one of claims 10 to 17,
characterized in that it is made from a bulk super-
conducting material. ¹⁵
20. Application of the coil according to any one of claims
10 to 19 to a magnet for intense or homogeneous
field. ²⁰
21. Application of the coil according to any one of claims
10 to 19 to a solenoid gradient coil of a nuclear mag-
netic resonance machine.

²⁵³⁰³⁵⁴⁰⁴⁵⁵⁰⁵⁵

FIG. 1

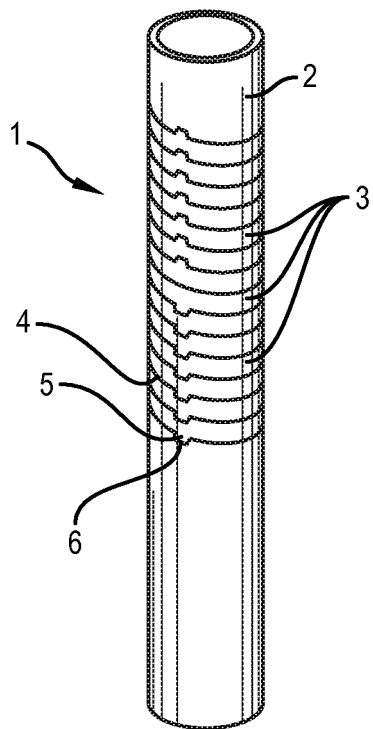
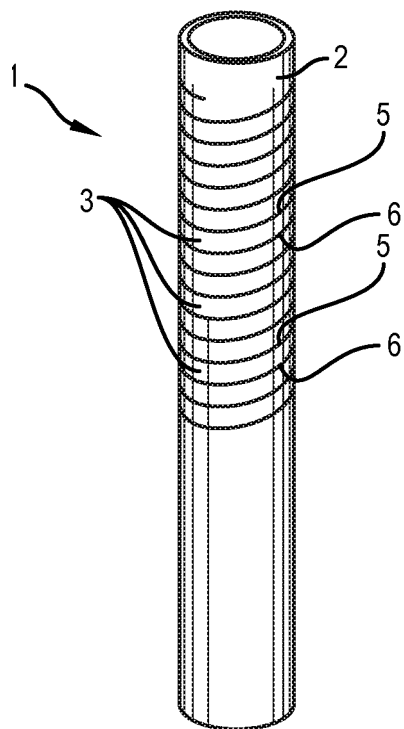


FIG. 2



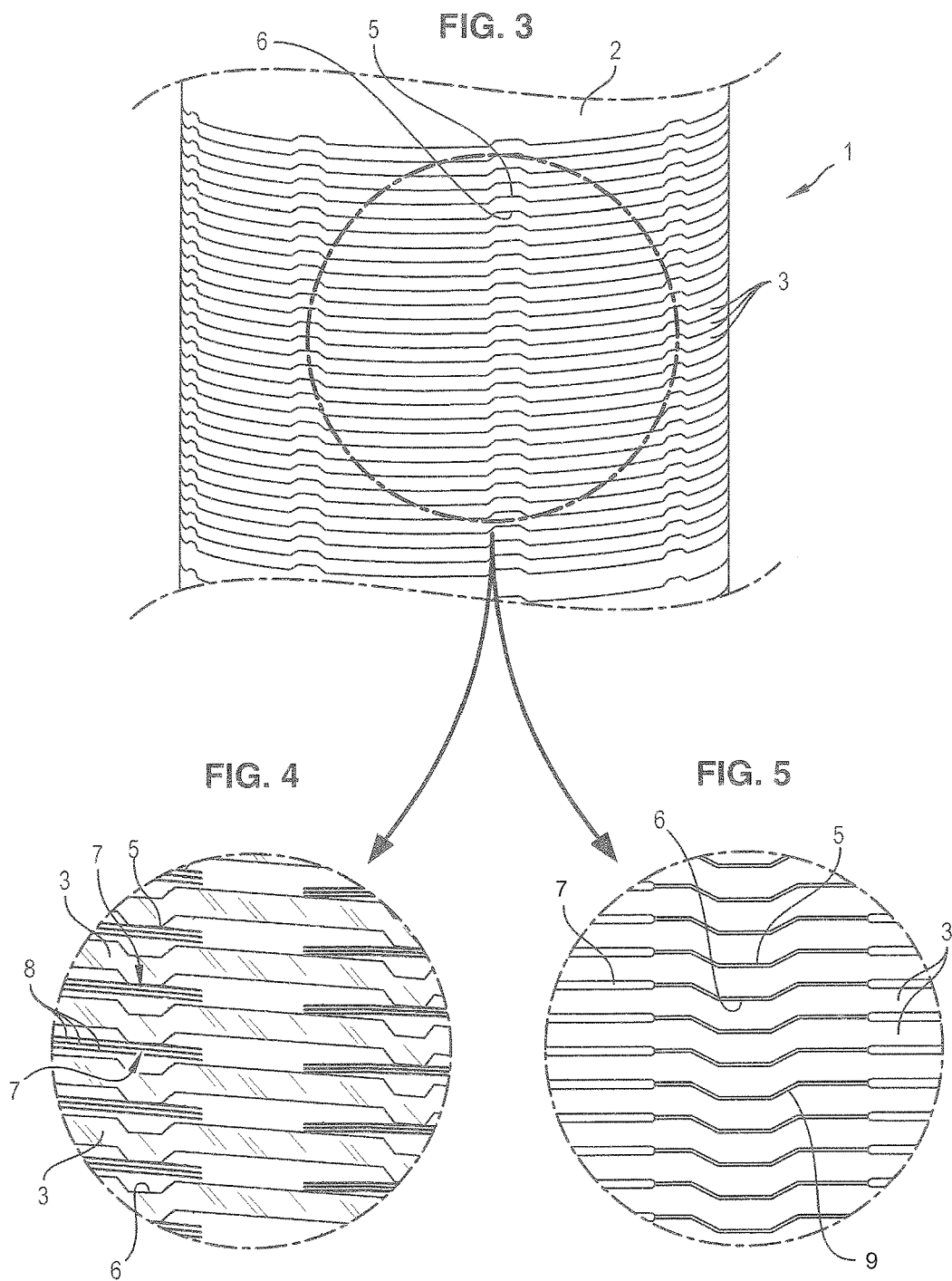
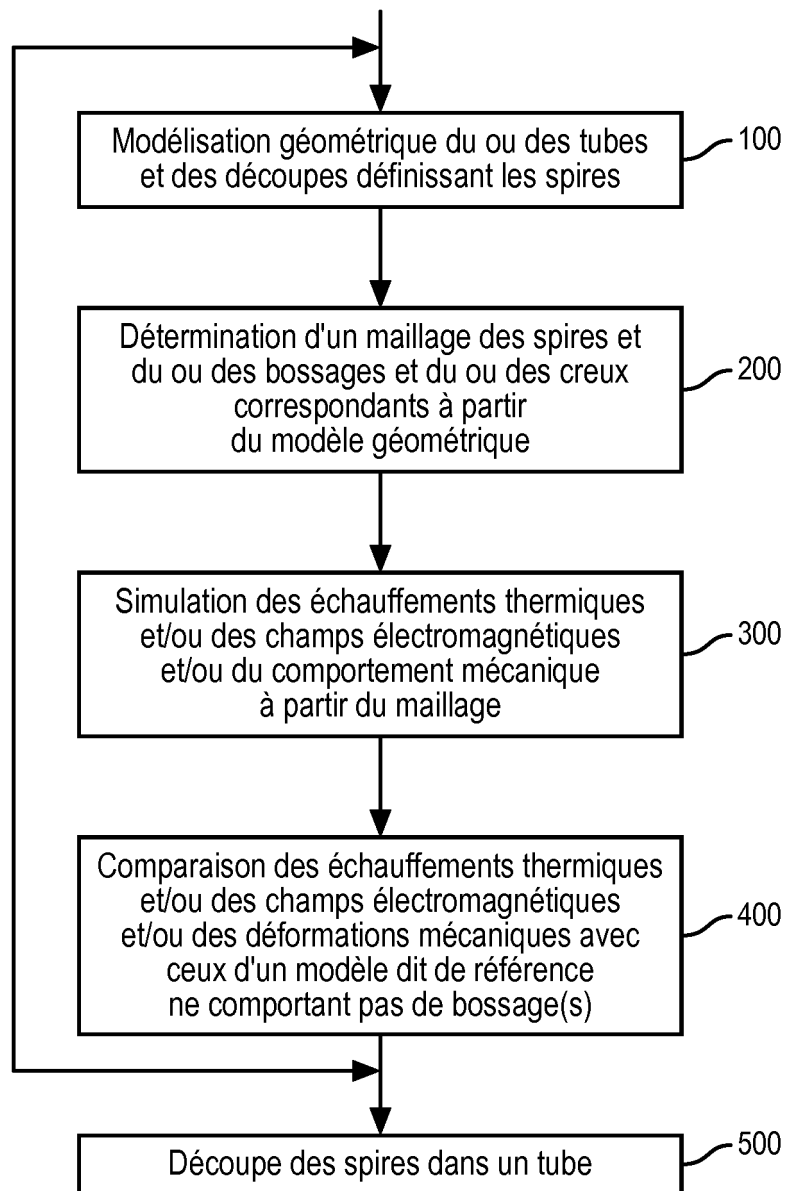


FIG. 6



RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- FR 2892524 [0006]
- US 2592802 A [0008] [0009]
- EP 0146494 A [0008] [0010]
- US 3466743 A [0008] [0011]

Littérature non-brevet citée dans la description

- CHRISTOPHE TROPHIME ; KONSTANTIN EGOROV ; FRANÇOIS DEBRAY ; WALTER JOSS ; GUY AUBERT. Magnet Calculations at the Grenoble High Magnetic Field Laboratory. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Mars 2002, vol. 12 (1 [0062]