

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
16. August 2012 (16.08.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/107035 A2

- (51) **Internationale Patentklassifikation:** Nicht klassifiziert
- (21) **Internationales Aktenzeichen:** PCT/DE2012/100027
- (22) **Internationales Anmeldedatum:**
9. Februar 2012 (09.02.2012)
- (25) **Einreichungssprache:** Deutsch
- (26) **Veröffentlichungssprache:** Deutsch
- (30) **Angaben zur Priorität:**
10 2011 011 023.2
11. Februar 2011 (11.02.2011) DE
- (71) **Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US):** FEAAM GMBH [DE/DE]; Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg (DE).
- (72) **Erfinder; und**
- (75) **Erfinder/Anmelder (nur für US):** DAJAKU, Gurakuq [—/DE]; Lilienthalstrasse 16, 85579 Neubiberg (DE).
- (74) **Anwalt:** EPPING HERMANN FISCHER PATENTANWALTSGESELLSCHAFT MBH; Ridlerstr. 55, 80339 München (DE).
- (81) **Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart):** AE, AG, AL,

AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart):** ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

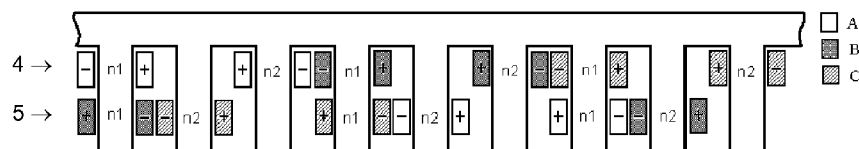
Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

(54) **Title:** ELECTRIC MACHINE

(54) **Bezeichnung :** ELEKTRISCHE MASCHINE

Fig. 6



(57) **Abstract:** The proposed principle relates to an electric machine having a stator (1) and a rotor (2) that can move relative to the stator. The stator (1) comprises a first and at least one second winding system (4, 5) that have coils, each of which is placed in stator grooves (3) and is wound around stator teeth (6). The first winding system (4) and the second winding system (5) each have at least one tooth (7) around which no coil is wound. When combining the first and the second winding system (4, 5), all teeth of the stator (1) have coils wound around them.

(57) **Zusammenfassung:** Das vorgeschlagene Prinzip betrifft eine elektrische Maschine mit einem Stator (1) und einem relativ dazu beweglichen Rotor (2). Der Stator (1) umfasst ein erstes und zumindest ein zweites Wicklungssystem (4, 5), welche Spulen aufweisen, die jeweils in Nuten (3) des Stators eingelegt und um Zähne (6) des Stators gewickelt sind. Das erste Wicklungssystem (4) und das zweite Wicklungssystem (5) weisen, jeweils für sich genommen, mindestens einen unbewickelten Zahn (7) auf. Bei Kombination von erstem und zweitem Wicklungssystem (4, 5) sind alle Zähne des Stators (1) bewickelt.



WO 2012/107035 A2

Beschreibung

Elektrische Maschine

5 Die vorliegende Erfindung betrifft eine elektrische Maschine.

Elektrische Maschinen umfassen üblicherweise einen gehäuse-
festen Stator sowie einen Rotor, der relativ zum Stator be-
weglich ist. Beispielsweise kann der Rotor relativ zum Stator
10 drehbar oder linear verschiebbar gelagert sein.

Elektrische Maschinen werden den elektromechanischen Energie-
wandlern zugeordnet. Dabei können sie motorisch oder genera-
torisch arbeiten.

15

Elektrische Maschinen können beispielsweise zum Antrieb von
Kraftfahrzeugen eingesetzt werden. Hierbei sind bestimmte Ei-
genschaften des Betriebsverhaltens der elektrischen Maschine
wünschenswert. Hierzu zählen beispielsweise das Drehmoment,
20 die akustischen Eigenschaften, die Verluste im Eisen sowie in
Permanentmagneten, falls diese eingesetzt werden, sowie die
Verluste in elektrischen Wicklungen. Gegenüber elektrischen
Maschinen mit verteilten Wicklungen zeichnen sich solche mit
konzentrierten Wicklungen durch kompaktes Design und vereinfach-
25 fachte Herstellung aus.

Insbesondere in Fahrzeugantrieben haben sich Mehrphasenma-
schinen durchgesetzt, vorwiegend solche mit drei elektrischen
Phasen oder Strängen. Eine Dreiphasenmaschine ist dabei an
30 ein elektrisches Dreiphasensystem mit drei zueinander um je-
weils 120° verschobenen Phasen anschließbar.

Die vom Stator im Betrieb hervorgerufene magnetomotorische Kraft MMK, englisch magnetomotive force, MMF, kann für einen gegebenen Wicklungstyp analysiert werden. Dabei wird die magnetomotorische Kraft in ihre harmonischen Komponenten, beispielsweise mit einer Fourier-Zerlegung, aufgespalten. Alle harmonischen Komponenten außer derjenigen, die als Arbeitswelle der elektrischen Maschine genutzt wird, sind unerwünscht, da sie zu Verlusten führen können und zudem unerwünschte, insbesondere akustische Beeinträchtigungen verursachen können.

In den Dokumenten DE 10 2008 051 047 A1 und DE 10 2008 057 349 B3 werden mehrere Wicklungen miteinander in einem Stator kombiniert, um bestimmte höhere Harmonische und/oder Subharmonische der magnetomotorischen Kraft zu reduzieren. Die DE 10 2008 057 349 B3 zeigt dabei eine konzentrierte Wicklung.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine elektrische Maschine anzugeben, bei der unerwünschte harmonische Komponenten der elektromotorischen Kraft mit geringem Aufwand reduziert werden können.

Die Erfindung wird durch eine elektrische Maschine mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst. Weiterbildungen und Ausgestaltungen sind in den abhängigen Patentansprüchen angegeben.

In einer Ausführungsform umfasst die elektrische Maschine einen Stator und einen relativ zum Stator beweglichen Rotor. Der Stator umfasst zumindest zwei Wicklungssysteme. Die Wicklungssysteme umfassen Spulen, die jeweils in Nuten des Stators eingelegt werden. Zwischen benachbarten Nuten des Sta-

tors sind Zähne gebildet, um die die Spulen gewickelt sind. Das erste Wicklungssystem und das zweite Wicklungssystem weisen, jeweils für sich genommen, mindestens einen unbewickelten Zahn auf, bevor die Wicklungssysteme miteinander kombiniert werden. Nach Kombination der beiden Wicklungssysteme in dem gemeinsamen Stator sind alle Zähne des Stators bewickelt. Das bedeutet, dass jeder Zahn des Stators entweder nur von einer Spule des ersten Wicklungssystems oder nur von einer Spule des zweiten Wicklungssystems oder von je einer Spule des ersten und zweiten Wicklungssystems bewickelt ist.

Mit anderen Worten werden in das erste Wicklungssystem mindestens ein unbewickelter Zahn eingefügt und in das zweite Wicklungssystem ebenfalls mindestens ein unbewickelter Zahn eingefügt, wobei die unbewickelten Zähne von erstem und zweitem Wicklungssystem unterschiedliche Zähne des Stators sind. Dadurch ergibt sich bei Kombination der beiden Wicklungssysteme, dass kein Zahn des Stators unbewickelt bleibt.

Analysiert man bei einer derartigen elektrischen Maschine die Verteilung der magnetomotorischen Kraft und der entsprechenden Harmonischen, so erkennt man, dass unerwünschte Harmonische der magnetomotorischen Kraft signifikant reduziert werden. Als unerwünscht gelten dabei alle harmonischen Komponenten, die nicht als Arbeitswelle genutzt werden. Dies können höhere Harmonische und/oder Sub-Harmonische sein, wobei die Begriffe *höher* und *Sub-* jeweils auf die Ordnung der Harmonischen bezogen auf die Ordnung der als Arbeitswelle genutzten Harmonischen bezogen sind.

30

Bevorzugt sind das erste und das zweite Wicklungssystem so ausgebildet, dass sie jeweils konzentrierte Spulen umfassen, wobei die Spulen um je genau einen Zahn des Stators gewickelt

sind. Dies wird als konzentrierte Wicklung bezeichnet. Somit ergibt sich eine besonders einfache Fertigungsmöglichkeit der Wicklung und der gesamten Maschine.

5 Als konzentrierte Wicklung wird vorliegend eine Wicklung verstanden, bei der die Windungen oder Spulen um je einen Zahn konzentriert sind, das heißt einander innerhalb eines Wicklungssystems nicht überlappen. Bevorzugt ist das vorgeschlagene Prinzip bei einer elektrischen Maschine mit neun Nuten
10 und vier Polen anwendbar. Weiterhin ist das vorgeschlagene Prinzip vorteilhaft bei einer Maschine mit 18 Nuten und zehn Polen anwendbar. Als Pole werden dabei magnetische Pole des Rotors verstanden, die Nord- und Südpole umfassen. Eine Maschine mit zehn Polen weist entsprechend fünf Polpaare auf,
15 da jedes Polpaar einen Nord- und einen Südpol umfasst. Es sind auch Vielfache der genannten Zahlenwerte möglich.

In einer Ausführungsform werden bei dem vorgeschlagenen Prinzip in erstem und zweitem Wicklungssystem eine Einschicht-
20 und eine Mehrschichtwicklung miteinander kombiniert.

Es können mehr als zwei Wicklungssysteme miteinander kombiniert werden.

25 Zur Realisierung einer mehrphasigen elektrischen Maschine weisen das erste und das zweite Wicklungssystem bevorzugt jeweils mehrere elektrische Stränge auf. Dabei ist jeder elektrischen Phase eines elektrischen Stromsystems, an das die elektrische Maschine anschließbar ist, je ein elektrischer
30 Strang jedes Wicklungssystems zugeordnet.

In einer Ausführungsform ist in jedem Wicklungssystem der mindestens eine unbewickelte Zahn zwischen Zähnen angeordnet,

die mit Spulen bewickelt sind, die unterschiedlichen elektrischen Strängen dieses Wicklungssystems zugeordnet sind.

Alternativ kann der mindestens eine unbewickelte Zahn jedes
5 Wicklungssystems zwischen Zähnen angeordnet sein, die mit Spulen bewickelt sind, die dem gleichen elektrischen Strang dieses Wicklungssystems zugeordnet sind.

Bei einer Weiterbildung des vorgeschlagenen Prinzips weisen
10 unmittelbar benachbarte Spulen des gleichen elektrischen Strangs und des gleichen Wicklungssystems unterschiedliche Windungszahlen auf. Hierdurch ist es möglich, gezielt bestimmte höhere Harmonische der Fourier-Zerlegung der magnetomotorischen Kraft auf Null oder nahe Null zu reduzieren.

15

Das erste und das zweite Wicklungssystem haben bevorzugt den gleichen Aufbau, insbesondere die gleiche Wicklungstopologie.

Bevorzugt sind das erste und das zweite Wicklungssystem
20 elektrisch miteinander verbunden.

In einer Ausführungsform sind das erste und das zweite Wicklungssystem zueinander um einen bestimmten elektrischen Winkel mechanisch verschoben. Aus praktischen Gründen erfolgt
25 die Verschiebung der Wicklungssysteme zueinander bevorzugt um eine bestimmte, ganzzahlige Anzahl von Nuten des Stators.

In einer Ausführungsform sind das erste und das zweite Wicklungssystem zueinander phasenrichtig seriell verschaltet und
30 werden von einem gemeinsamen Inverter gespeist, welcher das elektrische Stromsystem bereitstellt.

Wenn der Stator ein drittes Wicklungssystem umfasst, so kann dieses ebenfalls mechanisch verschoben sein.

5 Bevorzugt erfolgt eine mechanische Verschiebung eines dritten und vierten Wicklungssystems, die ebenfalls zueinander verschoben sind, bezogen auf die Kombination aus erstem und zweitem Wicklungssystem um den gleichen elektrischen Winkel, um den das zweite relativ zum ersten Wicklungssystem und das vierte relativ zum dritten Wicklungssystem verschoben ist.

10

Der Rotor kann beispielsweise einen der folgenden Typen umfassen: Käfigläufer, Mehrschichtrotor, Permanentmagnetrotor, Rotor mit vergrabenen Magneten.

15 Die elektrische Maschine kann mit Innenläufer oder als Maschine mit Außenläufer aufgebaut sein.

Die elektrische Maschine kann einen der folgenden Typen umfassen: Linearmaschine, Radialflussmaschine, Axialflussmaschine, Asynchronmaschine, Synchronmaschine, bürstenlose
20 Gleichstrommaschine.

Bevorzugt wird als Arbeitswelle der elektrischen Maschine nicht die Grundwelle genutzt.

25

Die Erfindung wird nachfolgend an mehreren Ausführungsbeispielen anhand von Zeichnungen näher erläutert.

Dabei zeigen:

30

Figur 1 eine beispielhafte herkömmliche Wicklungstopologie für eine dreiphasige Wicklung für einen Stator mit

sechs Nuten und einer Anzahl von zwei benachbarten Spulen pro Phase,

- Figur 2 die Verteilung der magnetomotorischen Kraft und
5 entsprechender Harmonischer in ihrer Fourier-Analyse zu der Wicklungstopologie von Figur 1,
- Figur 3 Einflussfaktoren auf die magnetomotorische Kraft
aufgetragen über einem Verschiebungswinkel,
10
- Figur 4 eine Transformation der Topologie von Figur 1 auf
eine Wicklungstopologie mit neun Nuten,
- Figur 5 die zugehörige Verteilung von magnetomotorischer
15 Kraft und entsprechender Harmonischer in ihrer Fourier-Analyse,
- Figur 6 eine beispielhafte Kombination zweier Wicklungssysteme gemäß Figur 4 nach dem vorgeschlagenen Prinzip,
20 die um einen elektrischen Winkel mechanisch zueinander verschoben sind,
- Figur 7 die zu Figur 6 gehörigen Verteilungen von magnetomotorischer Kraft und entsprechender Harmonischer
25 in ihrer Fourier-Analyse,
- Figur 8 die Verteilung von magnetomotorischer Kraft und
entsprechender Harmonischer in ihrer Fourier-Analyse gemäß der Ausführung von Figur 6, wenn unterschiedliche
30 Windungszahlen im Verhältnis 3/4 verwendet werden,

- Figur 9 die Verhältnisse von Figur 8, jedoch für ein Windungszahlenverhältnis von $3/7$,
- Figur 10 die Verhältnisse von Figur 9, jedoch für ein Windungszahlenverhältnis von $5/8$,
- Figur 11 eine beispielhafte Ausführungsform des vorgeschlagenen Prinzips anhand einer Kombination von zwei kombinierten Wicklungssystemen gemäß Figur 6, wobei die kombinierten Wicklungssysteme von Figur 6 wiederum um einen elektrischen Winkel mechanisch zueinander verschoben sind,
- Figur 12 die Verteilung von magnetomotorischer Kraft und entsprechender Harmonischer in ihrer Fourier-Analyse für die Ausführung mit vier Wicklungssystemen gemäß Figur 11 bei einem Windungszahlenverhältnis von $3/7$,
- Figur 13 den Übergang von einer Vierschichtwicklung auf eine äquivalente Dreischichtwicklung an einer beispielhaften Ausführung des vorgeschlagenen Prinzips,
- Figur 14 ein anderes Ausführungsbeispiel, zunächst ausgehend von einer Wicklungstopologie mit zwölf Nuten und zwei Spulengruppen mit je zwei benachbarten Spulen eines Stranges und drei Phasen,
- Figur 15 die Verteilung von magnetomotorischer Kraft und entsprechender Harmonischer in ihrer Fourier-Analyse gemäß der Ausführung von Figur 14,

- Figur 16 Einflussfaktoren auf die magnetomotorische Kraft aufgetragen über dem Verschiebungswinkel für unterschiedliche Anzahl von Statornuten,
- 5 Figur 17 eine Transformation der Wicklungstopologie von Figur 14 auf 18 Nuten, durch Einfügen unbewickelter Zähne,
- Figur 18 die zugehörige Verteilung von magnetomotorischer Kraft und entsprechenden Harmonischen in ihrer Fourier-Analyse,
- 10
- Figur 19 die Verteilung gemäß Figur 18, jedoch für unterschiedliche Windungszahlen,
- 15
- Figur 20 eine beispielhafte Ausführung gemäß dem vorgeschlagenen Prinzip an einem Beispiel einer Kombination zweier Wicklungstopologien von Figur 17, welche zueinander mechanisch verschoben sind,
- 20
- Figur 21 die Verteilung von magnetomotorischer Kraft und entsprechender Harmonischer in ihrer Fourier-Analyse der Ausführung von Figur 20,
- 25
- Figur 22 eine beispielhafte Ausführung des vorgeschlagenen Prinzips anhand einer Kombination zweier zueinander verschobener Wicklungssystemkombinationen gemäß Figur 20 zu einer vierlagigen Wicklung,
- 30
- Figur 23 die zugehörigen Diagramme der magnetomotorischen Kraft und der Zerlegung der entsprechenden Harmonischen in ihrer Fourier-Analyse zu Figur 22,

- Figur 24 eine weitere Ausführungsform des vorgeschlagenen Prinzips mittels Vereinfachung des Wicklungssystems,
- 5 Figur 25 einen beispielhaften Vergleich der entsprechenden Harmonischen der magnetomotorischen Kraft gemäß dem vorgeschlagenen Prinzip mit dem herkömmlichen Prinzip,
- 10 Figur 26 eine beispielhafte Weiterbildung der Ausführung von Figur 20 mit unterschiedlichen Windungszahlen, gemäß dem vorgeschlagenen Prinzip,
- Figur 27 Diagramme der magnetomotorischen Kraft und der ent-
15 sprechenden Harmonischen in ihrer Fourier-Analyse für das Beispiel gemäß Figur 26,
- Figur 28 eine alternative Ausführungsform des vorgeschlagenen Prinzips bezüglich der Ausführung von Figur 26
20 mit unterschiedlichen Windungszahlen derselben Spulen in benachbarten Nuten,
- Figur 29 die zum Beispiel der Figur 28 zugehörigen Diagramme der magnetomotorischen Kraft und der entsprechenden
25 Harmonischen in ihrer Fourier-Analyse,
- Figur 30 eine Anwendung eines beispielhaften Stators nach dem vorgeschlagenen Prinzip in einer elektrischen Maschine und
30
- Figur 31 ein weiteres Beispiel einer elektrischen Maschine mit einem Stator nach dem vorgeschlagenen Prinzip.

Figur 1 zeigt eine Topologie eines Wicklungssystems mit drei Strängen A, B, C. Die Anzahl der elektrischen Stränge des elektrischen Wicklungssystems gemäß Figur 1 beträgt drei und entspricht damit der Zahl 3 der elektrischen Phasen eines elektrischen Systems, an welches das dreisträngige Wicklungssystem angeschlossen werden kann. Die Anzahl der elektrischen Stränge wird mit m bezeichnet.

Ein Stator 1, in welchen das Wicklungssystem eingebracht ist, umfasst sechs Nuten. Die Anzahl der Nuten wird mit Z bezeichnet. Zur einfacheren Darstellung ist der Stator 1 sowie das darin eingebrachte Wicklungssystem in abgewickelter, linearisierter Darstellung gezeigt, kann jedoch alternativ auch in einer rotierenden Maschine mit einem Stator kreisförmigen Querschnitts ausgeführt sein. Bei einer Linearmaschine könnte sich der gezeigte Stator-Abschnitt periodisch wiederholen.

Weiterhin ist die elektrische Wicklung gemäß Figur 1 dadurch charakterisiert, dass es sich um eine konzentrierte Wicklung handelt, bei der alle Spulen aller elektrischer Stränge A, B, C um jeweils genau einen Zahn des Stators gewickelt sind. Zähne 6 des Stators 1 sind zwischen benachbarten Nuten 3 gebildet. Alle Nuten und alle Zähne bei der Ausführung gemäß Figur 1 haben gleiche geometrische Abmessungen. Ebenso haben in diesem Beispiel alle Spulen aller elektrischer Stränge des Wicklungssystems gleiche Windungszahlen.

Die Wicklung gemäß Figur 1 weist jeweils zwei benachbarte Spulen +, - des gleichen elektrischen Strangs A, B, C auf. Diese Anzahl der Spulen des gleichen Strangs ist mit dem Symbol n gekennzeichnet.

Benachbarte Spulen des gleichen elektrischen Strangs A, B, C sind jeweils in entgegengesetztem Wicklungssinn gewickelt, was in der Zeichnung durch entsprechende Plus- und Minus-Symbole +, - dargestellt ist, aus denen sich der Wicklungs-
5 sinn ableiten lässt.

Insgesamt handelt es sich bei der Ausführung gemäß Figur 1 demnach um eine $n = 2$, $m = 3$, $Z = 6$ Wicklungsverteilung.

10 Figur 2 zeigt für das Ausführungsbeispiel gemäß Figur 1 die Verteilung der magnetomotorischen Kraft MMF über 360 Grad in der linken Bildhälfte und die Verteilung der Harmonischen dieser magnetomotorischen Kraft in der rechten Bildhälfte, welche sich beispielsweise durch eine Fourier-Analyse ergibt.

15

Figur 3 zeigt Einflussfaktoren auf die elektromotorische Kraft aufgetragen über die Anzahl der Nuten des Stators anhand einer Parameterschar für unterschiedliche mechanische Verschiebungen um eine ganzzahlige Anzahl von Nuten. Dabei
20 werden zwei Wicklungssysteme, beispielsweise mit dem Aufbau gemäß Figur 1, zueinander verschoben, wie beispielsweise in dem Dokument DE 10 2008 051 047 A1 erläutert. Insofern wird dieses Dokument vollinhaltlich in Bezug genommen.

25 Man erkennt, dass für eine mechanische Verschiebung um vier Nuten die erste Harmonische, das heißt die Grundwelle, um ungefähr 75 % und die vierte und fünfte höhere Harmonische um etwa 25 % reduziert werden.

30 Das bedeutet, dass es bei Nutzung einer Statortopologie mit neun Nuten es möglich ist, die Leistungsfähigkeit eines Wicklungssystems für $n = 2$ und $m = 3$ zu verbessern, indem man

zwei identische konzentrierte Wicklungssysteme miteinander kombiniert, die relativ zueinander verschoben sind.

Die Verteilung der Einflussfaktoren auf die elektromotorische Kraft in Figur 3 berechnet sich dabei nach der Formel:

$${}^v\xi_Z = \cos\left(v \cdot \frac{\alpha_w}{2}\right) = \cos\left(v \cdot \frac{2\pi}{Q_s} \cdot k_Q\right)$$
$$k_Q = 1, 2, 3, \dots, Q_s$$

Dabei bezeichnet α_w den elektrischen Verschiebungswinkel, um den die Wicklungssysteme relativ zueinander verschoben sind, zum Beispiel um vier Nuten.

Transformiert man die Wicklungstopologie von Figur 1 auf einen Stator mit neun Nuten gemäß Figur 4, so ergeben sich vollständig unbewickelte Zähne 7. Die unbewickelten Zähne sind, ausgehend von Figur 1, im Beispiel von Figur 4 jeweils zwischen solchen Zähnen 6 eingefügt, welche zum gleichen Strang A, B, C des jeweiligen Wicklungssystems gehören.

Figur 5 zeigt korrespondierend zu Figur 2 die zu Figur 4 zugehörige Verteilung von magnetomotorischer Kraft und den Harmonischen.

Figur 6 zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel eines Stators für eine elektrische Maschine nach dem vorgeschlagenen Prinzip. Die Ausführung von Figur 6 beruht dabei auf zwei identischen Wicklungssystemen gemäß der Ausführung von Figur 4, welche zueinander um vier Nuten mechanisch verschoben sind. Bezüglich des Aufbaus der beiden zueinander verschobenen, ersten und zweiten konzentrierten, elektrischen Wicklungssys-

teme wird auf die vorangegangenen Ausführungsbeispiele verwiesen, die an dieser Stelle nicht wiederholt werden sollen.

Man erkennt, dass das erste und das zweite Wicklungssystem 4, 5 jeweils drei Phasen, konzentrierte Spulen und zwei benachbarte Spulen vom gleichen Strang der gleichen Wicklung umfassen. Die resultierende Wicklung ist eine zweilagige Wicklung. Während das erste und das zweite Wicklungssystem, jeweils für sich genommen, mindestens einen unbewickelten Zahn 7 aufweisen, bleibt bei der kombinierten, zweilagigen Wicklung gemäß Figur 6 keiner dieser neun Zähne 6, 7 unbewickelt.

Figur 7 zeigt anhand der Schaubilder von magnetomotorischer Kraft und Harmonischen, dass mit der Ausführung von Figur 6 eine signifikante Reduzierung unerwünschter Harmonischer möglich ist. Die zweite Harmonische wird als Arbeitswelle genutzt. Demgegenüber ist die erste Harmonische eine unerwünschte Subharmonische, welche um ungefähr 75 % reduziert ist. Vierte und fünfte Harmonische, welche gegenüber der Arbeitswelle höhere Harmonischer repräsentieren, sind um ungefähr 25 % reduziert. Dies gilt für den Fall identischer Windungszahlen n_1 , n_2 für alle Spulen aller Stränge A, B, C aller Wicklungssysteme 4, 5 gemäß Figur 6.

Demgegenüber zeigt Figur 8 eine Auswirkung einer Weiterbildung der Figur 6, nämlich für ein Windungszahlenverhältnis $n_1:n_2$ von 3/4. Während in Figur 7 dieses Windungszahlenverhältnis 1 beträgt, führt das Windungszahlenverhältnis $n_1:n_2 = 3/4$ zu einer praktisch vollständigen Eliminierung der ersten Harmonischen. Das heißt, dass die Grundwelle praktisch verschwindet.

Figur 9 zeigt magnetomotorische Kraft und höhere Harmonische für den Fall, dass das Windungszahlenverhältnis $3/7$ beträgt.

Entsprechend erläutert Figur 10 die Verhältnisse bei einem
5 Windungszahlenverhältnis von $5/8$. Während bei Figur 9 die vierte und fünfte Harmonische praktisch komplett verschwinden, zeigt Figur 10 eine Ausführung mit deutlich reduzierter vierter und fünfter Harmonischer.

10 Wie Figur 6 zeigt, wechseln sich bei den Ausführungen gemäß Figur 8 bis 10 Spulen der ersten und zweiten Windungszahl n_1 , n_2 ab, wobei je eine Spule jedes elektrischen Stranges mit einer ersten Windungszahl ausgeführt ist, während die zugehörige zweite Spule des gleichen elektrischen Stranges jeweils
15 mit einer zweiten Windungszahl ausgeführt ist.

Die Ausführungsbeispiele von Figur 6 bis Figur 10 mit unterschiedlicher Windungszahl beruhen jeweils auf einer zweilagigen, konzentrischen Wicklungstopologie vom Typ $Z = 9$,
20 $n=2$, $m=3$.

Figur 11 zeigt eine Weiterbildung der Ausführung von Figur 6 nach dem vorgeschlagenen Prinzip, bei der unerwünschte Harmonische weiter reduziert werden. Hierbei ist die zweilagige
25 Wicklung gemäß Figur 6 nochmals verdoppelt, wobei die beiden Kombinationen von Wicklungssystemen, die jeweils gemäß Figur 6 aufgebaut sind, wiederum zueinander um vier Nuten mechanisch verschoben sind. Bei dieser Kombination gemäß Figur
30 11 werden die erste, vierte und fünfte Harmonische nochmals um 75 beziehungsweise 25 % reduziert. In praktischen Anwendungen werden somit die erste, vierte und fünfte Harmonische auf praktisch Null reduziert, wie aus der Verteilung von mag-

netomotorischer Kraft und der Harmonischen der MMK gemäß Figur 12 deutlich wird.

Figur 13 zeigt eine Vereinfachung der Ausführung von Figur 5
11. Die obere Bildhälfte der Figur 13 entspricht der Ausführung von Figur 11. Fasst man die beiden mittleren Lagen zusammen und addiert jeweils die Windungszahlen n_1 , n_2 gleicher Spulen mit gleichem Wicklungssinn und von gleichem Strang miteinander, so ergibt sich die in Figur 13 unten dargestellte
10 Wicklungstopologie. Dabei wird das vierlagige Wicklungssystem in ein dreilagiges Wicklungssystem transformiert. Auch hierbei handelt es sich um eine $Z = 9$, $n = 2$, $m = 3$ Wicklung. Die mittlere Wicklungsschicht gemäß Figur 13 in der unteren Bildhälfte umfasst jeweils Spulen mit der Summe der Windungszahlen der beiden mittleren Lagen von Figur 11.
15

Ausgehend von einer herkömmlichen Wicklung für eine Maschine mit sechs Nuten sind demnach beispielsweise folgende Schritte beim Design der Maschine zu bewältigen, um gemäß dem vorgeschlagenen Prinzip beispielsweise eine Maschine mit neun Nuten und vier Polen des Rotors zu erhalten:
20

1. Analyse der Harmonischen der magnetomotorischen Kraft für eine gegebene Wicklung.
25

2. Untersuchung spezifischer Harmonischer der magnetomotorischen Kraft bezogen auf die Anzahl der Nuten des Stators, wie beispielsweise anhand des Beispiels von Figur 3 erläutert, wobei zwei identische Wicklungssysteme, die zueinander verschoben sind, benutzt werden.
30

3. Die ausgewählte Wicklung wird auf die gewünschte Statortopologie transformiert.

4. Es werden mehrere, identische konzentrierte Wicklungssysteme miteinander kombiniert und mechanisch zueinander verschoben. Hierdurch ergibt sich die gewünschte Reduzierung spezifischer Harmonischer der magnetomotorischen Kraft.

5. Die Wicklungssysteme werden in Serie verschaltet und mit einem einzigen Inverter, der die Stromversorgung mit mehreren elektrischen Phasen sicherstellt, versorgt.

10

Das beschriebene Vorgehen soll nachfolgend anhand einer zweiten Gruppe von Ausführungsbeispielen nochmals erläutert werden, wobei eine Maschine mit 18 Nuten des Stators und zehn Polen des Rotors mit konzentrierten Wicklungen angestrebt ist.

15

Analog zu Figur 1 zeigt die Ausführung von Figur 14 eine konzentrierte Wicklung mit $n = 2$, $m = 3$ und $Z = 12$. Dabei sind jedoch jeweils zwei Spulengruppen vorgesehen, was durch den Ausdruck $k_n=2$ repräsentiert wird. Demnach handelt es sich bei Figur 14 um eine Wicklungsverteilung mit $Z = 12$, $k_n=2$, $n=2$, $m=3$.

20

Die zugehörigen Diagramme von magnetomotorischer Kraft und Verteilung der Harmonischen sind in Figur 15 gezeigt.

25

Analog zu Figur 3 zeigt Figur 16 eine Kombination mechanisch zueinander verschobener Wicklungssysteme, die einen identischen Aufbau haben. Dabei sind entsprechend Figur 3 auch bei Figur 16 Einflussfaktoren auf die elektromotorische Kraft für verschiedene Harmonische der magnetomotorischen Kraft aufgetragen über dem Verschiebungswinkel zwischen den Wicklungssystemen. Wie man erkennt, werden die siebte und elfte höhere

30

Harmonische bei einer Verschiebung um vier Nuten um zirka 75 % reduziert. Das bedeutet, dass bei Nutzung einer Maschine mit 18 Nuten die Leistungsfähigkeit der $k_n=2$, $n=2$, $m=3$ Wicklung deutlich verbessert werden kann, wenn zwei identische konzentrierte Wicklungssysteme kombiniert werden.

Die Formel für die Einflussfaktoren auf die elektromotorische Kraft ist bereits oben zu Figur 3 angegeben und wird an dieser Stelle nicht wiederholt.

10

Entsprechend wird in dem Schritt von Figur 14 zu Figur 17 eine Transformation der $Z=12$, $k_n=2$, $n=2$, $m=3$ Wicklungstopologie auf eine 18 Nuten-Wicklungen durchgeführt.

Das Ergebnis ist in Figur 17 gezeigt und weist eine $Z=18$, $k_n=2$, $n=2$, $m=3$ Wicklung mit konzentrischen Spulen auf. Analog zu Figur 4 erkennt man anhand von Figur 17, dass unbewickelte Zähne zwischen Spulen des gleichen Strangs eingefügt wurden. Die zugehörigen Diagramme für magnetomotorische Kraft und Verteilung der Harmonischen zeigen Figuren 18 und 19, wobei Figur 18 den Fall gleicher Anzahl von Leiterabschnitten derselben Spule in benachbarten Nuten $N1 = N2$ betrifft, während Figur 19 den Fall unterschiedlicher Anzahl von Leiterabschnitten derselben Spule in benachbarten Nuten $N1 \neq N2$ an einem Beispiel beleuchtet.

Die unterschiedliche Anzahl von Leiterabschnitten derselben Spule in benachbarten Nuten kann auch als unterschiedliche Anzahl von Windungen der beiden Spulenseiten einer einzigen Spule bezeichnet werden.

Figur 20 zeigt eine Kombination zweier Wicklungssysteme nach dem vorgeschlagenen Prinzip, die jeweils den identischen Auf-

bau haben, wie er in Figur 17 gezeigt ist. Auch hier sind jedoch die beiden Wicklungssysteme zueinander um einen bestimmten elektrischen Winkel mechanisch verschoben, vorliegend in dem Beispiel um vier Nuten. Wie weiter oben anhand von Figur 5 16 gezeigt, ergibt sich bei einer Verschiebung von vier Nuten eine Reduzierung von siebter und elfter höherer Harmonischer um 75 %. Aufgrund der konzentrischen Wicklungen ist eine besonders einfache Fertigung möglich.

10 Figur 21 zeigt für die $Z=18$, $k_n=2$, $n=2$, $m=3$ Wicklung von Figur 20 die Verteilung der magnetomotorischen Kraft und der entsprechenden Harmonischen. Eine weitere Reduzierung ausgewählter höherer Harmonischer kann durch unterschiedliche Windungszahlen erzielt werden.

15

Kombiniert man ausgehend von dem Beispiel des vorgeschlagenen Prinzips zwei zweilagige Wicklungen gemäß Figur 20 miteinander und verschiebt diese Kombinationen von Wicklungssystemen wiederum relativ zueinander um vier Nuten, so ergibt sich die 20 Wicklungstopologie gemäß Figur 22. Die resultierende Wicklung hat insgesamt vier Lagen, wodurch die siebte und die elfte höhere Harmonische nochmals um 75 % reduziert werden, was praktisch eine Auslöschung dieser höheren Harmonischen bewirkt.

25

Während Figur 22 diese Wicklungstopologie zeigt, sind die entsprechenden Schaubilder in Figur 23 angegeben, die wiederum die Verteilung der magnetomotorischen Kraft und der Harmonischen belegen.

30

Anhand von Figur 24 im oberen Bild wird deutlich, dass die Wicklungstopologie von Figur 22 vereinfacht dargestellt werden kann, nämlich mit nur zwei Lagen, wobei die Zahlen 1 und

2 der jeweiligen Statorzähne bezeichnen, welche Anzahl von Spulen um den jeweiligen Zahn gewickelt ist.

Wie im mittleren Bild der Figur 24 dargestellt, ist in eini-
5 gen Nuten die Anzahl der Spulen der gleichen Phase identisch, diese Spulen weisen jedoch entgegen gesetzten Wicklungssinn auf, sodass die resultierende magnetische Kraft für diese Spulen in diesen Nuten 0 ist. Daher können diese Spulen entfernt werden, wie die mittlere Darstellung der Figur 24
10 zeigt. Hierdurch werden Kupferverluste im Stator reduziert, während die Charakteristika der Maschine ansonsten unbeeinflusst bleiben. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahlen von Leiterabschnitten in den verschiedenen Nuten können diese mit unterschiedlicher Nuttiefe ausgebildet werden. Das bedeutet,
15 dass gemessen vom oberen Zahnrand einige Nuten in radialer Richtung gesehen tiefer in den Stator hineinragen als andere. Daher kann der Stator mit unterschiedlicher Nuttiefe ausgebildet werden, wie im unteren Bild der Figur 24 gezeigt.

20 Figur 25 zeigt einen Vergleich der Harmonischen der magnetomotorischen Kraft für die vorgeschlagene Maschine mit 18 Nuten und zehn Polen gegenüber einer Maschine mit zwölf Nuten und zehn Polen mit herkömmlichem Aufbau.

25 Während bei dem Beispiel von Figur 17 unterschiedliche Anzahl von Leiterabschnitten N_1 , N_2 bei der gleichen Spule in verschiedenen Nuten benutzt werden, um die Grundwelle zu reduzieren, werden bei dem Beispiel der Figur 26 des vorgeschlagenen Prinzips jeweils Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen benutzt, um höhere Harmonische zu reduzieren. Die Windungszahlen der jeweiligen Spule sind dort mit erster Windungszahl n_1 beziehungsweise zweiter Windungszahl n_2 angegeben, welche voneinander verschieden sind. Ansonsten hat die
30

Topologie von Figur 26 den gleichen Aufbau wie in Figur 20 beschrieben. Das bedeutet, dass wiederum das erste und zweite Wicklungssystem zueinander um vier Nuten verschoben ist, wobei die Wicklungssysteme ansonsten identischen Aufbau haben.

5 Die Verwendung von Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen gilt dabei für benachbarte Spulen des gleichen Stranges A, B, C. Die Symbole n_1 , n_2 bezeichnen die Windungszahlen dieser Spulen.

10 Figur 27 zeigt die zugehörige Verteilung von magnetomotorischer Kraft und Harmonischen unter der Annahme, dass gilt:

$$n_1 \neq n_2,$$

15 zum Beispiel $n_1 = k \cdot 4$ und $n_2 = k \cdot 3$, mit $k = 1, 2, 3, \dots$

Eine Weiterbildung der Ausführung von Figur 26 ist in Figur 28 gezeigt. In Figur 28 wird, wie in DE 10 2008 057 349 B3 beschrieben, der Ansatz verwendet, Spulen mit unterschiedlicher Anzahl von Leiterabschnitten N_1 , N_2 in benachbarten Nuten bezogen auf die gleiche Spule zu erzielen, indem beispielsweise die Spule in axialer Richtung von der gleichen Seite des Stators nicht angeschlossen wird, sondern von verschiedenen Seiten. Mit anderen Worten hat dadurch eine bestimmte konzentrische Spule in einer Nut einen Leiterabschnitt mehr als in einer anderen, benachbarten Nut, in die diese Spule eingelegt ist. Anstelle der Bezeichnung der Anzahl der Leiterabschnitte mit den Bezugszeichen N_1 , N_2 werden diese zur einfacheren Darstellung vorliegend mit n_1 , n_1+1 bezeichnet.

20
25
30

Entsprechend ergibt sich beispielsweise in einer Nut eine Windungszahl von 4 und in der anderen Nut von 3. Bei diesem

Prinzip unterscheiden sich die Windungszahlen der gleichen Spule in benachbarten Nuten jeweils um 1. Hierdurch kann zusätzlich die Grundwelle reduziert werden, wie die zugehörigen Diagramme gemäß Figur 29 eindrucksvoll zeigen.

5

Dabei zeigt Figur 28 eine Topologie von $Z=18$, $k_n=2$, $n=2$, $m=3$ mit zwei zueinander verschobenen Wicklungssystemen mit gleichem Aufbau, Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen n_1 , n_2 und Spulen, die unterschiedliche Anzahl von Leiterabschnitten in verschiedenen Nuten der gleichen Spule aufweisen, was beispielsweise mit den Symbolen n_1 und n_1+1 in der Figur 28 dargestellt ist.

10

Figur 30 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer elektrischen Maschine mit einem Stator und einem Rotor. Als Stator kann nach dem vorgeschlagenen Prinzip beispielsweise einer der vorstehend beschriebenen Statoren mit der dort beschriebenen Wicklungstopologie zum Einsatz kommen. Die Ausführung nach Figur 30 umfasst einen Stator gemäß dem Beispiel von Figur 6

15

20

Entsprechend ist in Figur 31 ein Ausführungsbeispiel einer elektrischen Maschine mit einem Stator entsprechend der Ausführung von Figur 20 und einem Rotor gezeigt.

25

Selbstverständlich kann das vorgeschlagene Prinzip, nämlich Einfügen von unbewickelten Zähnen und Kombinieren zweier zueinander verschobener gleichartiger Wicklungssysteme auch auf andere Wicklungstopologien und Statortypen übertragen werden, ohne das vorgeschlagene Prinzip der Erfindung zu verlassen.

30

Nachdem das vorgeschlagene Prinzip anhand der beiden Gruppen von Ausführungsbeispielen gemäß der Figuren 1 bis 13 beziehungsweise 14 bis 29 erläutert wurde, sollen nachfolgend

nochmals einige Aspekte herausgestellt werden, die den Ausführungsbeispielen des vorgeschlagenen Prinzips gemeinsam sind. Dabei wird folgende Definition von Parametern zugrunde gelegt, die eine konzentrierte Wicklung kennzeichnen:

5		
	n	Anzahl der benachbarten Spulen der gleichen Phase,
	n_1, n_2	Windungszahl einer Spule
10	N_1, N_2	Anzahl von Leiterabschnitten derselben Spule in benachbarten Nuten
	k_n	Anzahl der Spulengruppen,
15	m	Anzahl der elektrischen Stränge,
	Z	Anzahl der Nuten,
	q	Anzahl der Nuten pro Pol pro Phase und
20		
	p	Anzahl der Polpaare.

Ausgehend von einer herkömmlichen konzentrierten ein- oder mehrphasigen elektrischen Wicklung gelangt man durch folgende Schritte zu der vorgeschlagenen Wicklung.

Zunächst werden in die konzentrierte Wicklung zusätzliche unbewickelte Zähne eingefügt. Hierdurch wird das Wicklungssystem auf eine größere Anzahl von Nuten transformiert. Anschließend wird dieses Wicklungssystem identisch zwei Mal in einem gemeinsamen Stator vorgesehen, wobei die Wicklungssysteme um eine bestimmte Anzahl von Nuten zueinander verschoben sind.

Hierbei kommen folgende Überlegungen zur Anwendung: Die allgemeine Formel für die Anzahl der Nuten des Stators lautet:

$$5 \quad Z = 2 * p * q * m.$$

Wenn die Anzahl der Spulen pro Phase bekannt ist sowie die Anzahl der elektrischen Phasen, kann die Anzahl der benötigten Statornuten Z für eine konzentrierte Wicklung alternativ
10 bestimmt werden mit der Vorschrift

$$Z = k_n * n * m.$$

Im Unterschied zu einer konventionellen Wicklung kann die Anzahl der Statornuten für einen bestimmten Wert von $(k_n * m)$
15 erhöht werden, um die Wicklungseigenschaften zu verbessern, ohne die Wicklungssymmetrie zu verändern. Folglich gilt für die Anzahl der Statornuten für eine derart modifizierte konzentrierte Wicklung die Vorschrift

$$20 \quad Z' = k_n * n * m + k_n * m = (n + 1) * k_n * m.$$

Es folgt für die Beispiele von Figur 1 beziehungsweise Figur 14 bei einer entsprechenden Transformation mit Einfügung unbewickelter Nuten:
25

$$\begin{array}{ll} Z6: n=2 \ \& \ m=3 & \Rightarrow & Z9: n=2 \ \& \ m=3 \\ Z12: k_n=2, \ n=2 \ \& \ m=3 & \Rightarrow & Z18: k_n=2, \ n=2 \ \& \ m=3, \end{array}$$

30 wobei die entsprechenden um unbewickelte Zähne angereicherten Topologien beispielhaft in Figur 4 beziehungsweise Figur 17 dargestellt sind. Diese Figuren zeigen, dass die Anzahl der Spulenseiten in den beiden Nuten des jeweiligen Zahns des

Stators für die modifizierte Wicklung verschieden ist. Es gibt Statornuten, die zwei Spulenseiten umfassen im Sinne einer Zweischichtwicklung, und es gibt Statornuten, die nur eine Spulenseite umfassen im Sinne einer Einschichtwicklung. .

5

Erhöht man derart die Anzahl der Statornuten ausgehend von einer konzentrierten konventionellen Wicklung, ergibt sich eine Erhöhung der Freiheitsgrade für die Optimierung dieser Wicklungstypen, insbesondere im Hinblick auf die Verringerung unerwünschter höherer Harmonischer beziehungsweise Subharmonischer. Hierfür können zwei derart modifizierte Wicklungssysteme kombiniert werden, welche von identischem Typ und Aufbau sind, jedoch um einen bestimmten elektrischen Winkel, das heißt eine bestimmte Anzahl von Statornuten, mechanisch zueinander verschoben sind. Dies ist bei den beschriebenen Ausführungsbeispielen anhand der Figuren 6 und 20 gezeigt, welche Ausführungsbeispiele nach dem vorgeschlagenen Prinzip zeigen.

10

15

Bezugszeichenliste

- 1 Stator
- 2 Rotor
- 5 3 Nut
- 4 erstes Wicklungssystem
- 5 zweites Wicklungssystem
- 6 Zahn
- 7 unbewickelter Zahn

Patentansprüche

1. Elektrische Maschine, aufweisend
- einen Stator (1),
 - 5 - einen relativ zum Stator (1) beweglichen Rotor (2),
 - wobei der Stator (1) ein erstes und zumindest ein zweites Wicklungssystem (4, 5) umfasst, die Spulen aufweisen, die jeweils in Nuten (3) des Stators (1) eingelegt und um Zähne (6) des Stators gewickelt sind,
 - 10 - wobei das erste Wicklungssystem (4) und das zweite Wicklungssystem (5), jeweils für sich genommen, jeweils mindestens einen unbewickelten Zahn (7) aufweisen, und
 - bei Kombination von erstem und zweitem Wicklungssystem (4, 5) alle Zähne des Stators (1) bewickelt sind.
- 15
2. Elektrische Maschine nach Anspruch 1, bei der das erste und das zweite Wicklungssystem (4, 5) jeweils konzentrierte Spulen (+, -) umfassen, die um je genau einen Zahn (6) gewickelt sind.
- 20
3. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder 2, bei der das erste und das zweite Wicklungssystem (4, 5) eine Einschicht- und eine Mehrschichtwicklung miteinander kombinieren.
- 25
4. Elektrische Maschine nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei der das erste und das zweite Wicklungssystem (4, 5) jeweils mindestens zwei elektrische Stränge (A, B, C) umfasst.
- 30
5. Elektrische Maschine nach Anspruch 4, bei der der mindestens eine unbewickelte Zahn (7) zwischen Zähnen angeordnet ist, die mit Spulen (+, -) bewickelt sind,

die unterschiedlichen elektrischen Strängen (A, B, C) zugeordnet sind.

6. Elektrische Maschine nach Anspruch 4,
5 bei der der mindestens eine unbewickelte Zahn (7) zwischen Zähnen angeordnet ist, die mit Spulen (+, -) bewickelt sind, die dem gleichen elektrischen Strang (A, B, C) zugeordnet sind.
- 10 7. Elektrische Maschine nach einem der Ansprüche 4 bis 6, bei der unmittelbar benachbarte Spulen des gleichen elektrischen Strangs (A, B, C) und des gleichen Wicklungssystems (4, 5) unterschiedliche Windungszahlen (n_1 , n_2) aufweisen.
- 15 8. Elektrische Maschine nach einem der Ansprüche 1 bis 7, bei der das erste und das zweite Wicklungssystem (4, 5) jeweils den gleichen Aufbau haben, miteinander elektrisch verbunden und zueinander mechanisch verschoben sind.
- 20 9. Elektrische Maschine nach einem der Ansprüche 1 bis 8, bei der das erste und das zweite Wicklungssystem (4, 5) zueinander phasenrichtig seriell verschaltet sind, um von einem gemeinsamen Inverter gespeist zu werden.
- 25 10. Elektrische Maschine nach einem der Ansprüche 1 bis 9, bei der der Stator (1) ein drittes Wicklungssystem umfasst, welches zur Kombination umfassend erstes und zweites Wicklungssystem (4, 5) mechanisch verschoben ist.
- 30 11. Elektrische Maschine nach einem der Ansprüche 1 bis 10, bei der der Rotor (2) zumindest einen der folgenden Typen umfasst: Käfigläufer, Mehrschichtrotor, Permanentmagnetrotor, Rotor mit vergrabenen Magneten.

12. Elektrische Maschine nach einem der Ansprüche 1 bis 11, die als Maschine mit Innenläufer oder als Maschine mit Außenläufer aufgebaut ist.

5

13. Elektrische Maschine nach einem der Ansprüche 1 bis 12, die einen der folgenden Typen umfasst: Linearmaschine, Radialflussmaschine, Axialflussmaschine, Asynchronmaschine, Synchronmaschine, bürstenlose Gleichstrommaschine.

10

14. Elektrische Maschine nach einem der Ansprüche 1 bis 13, bei der die Anzahl der Leiterabschnitte ($N_1, N_2; n_1, n_1+1$) derselben Spule in benachbarten Nuten verschieden ist.

Fig. 1

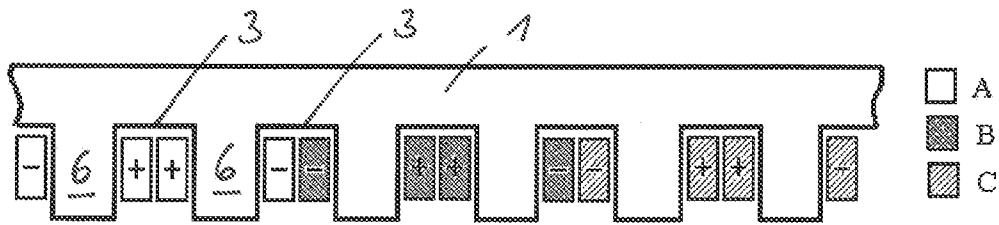


Fig. 2

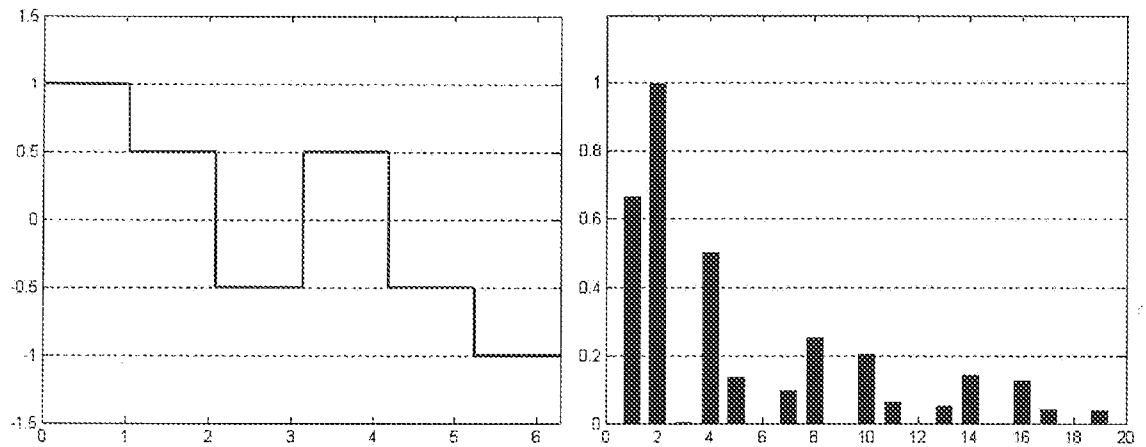


Fig. 3

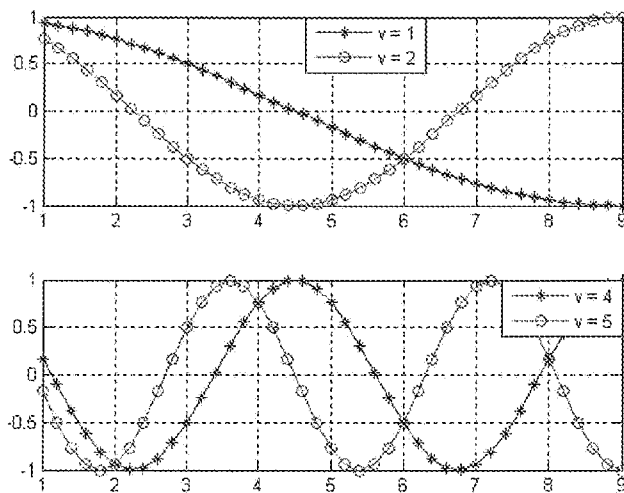


Fig. 4

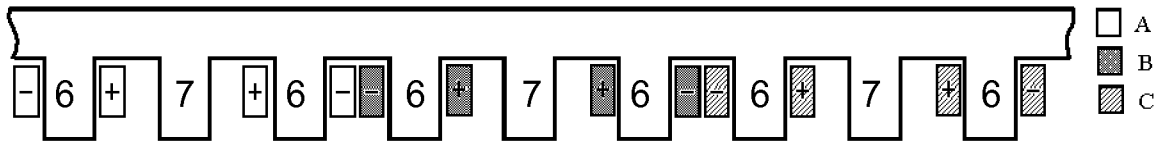


Fig. 5

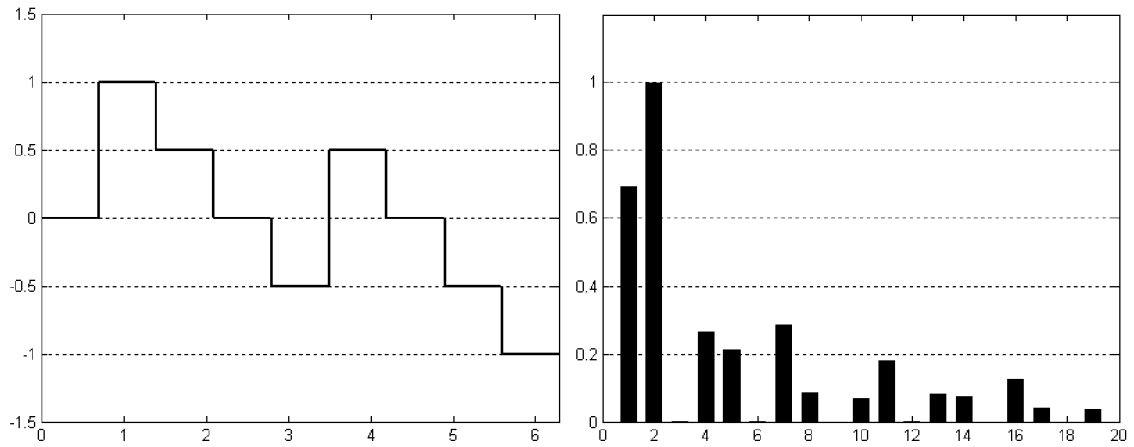


Fig. 6

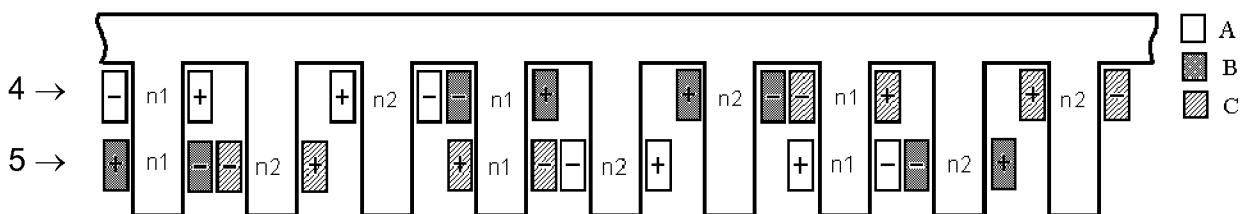


Fig. 7

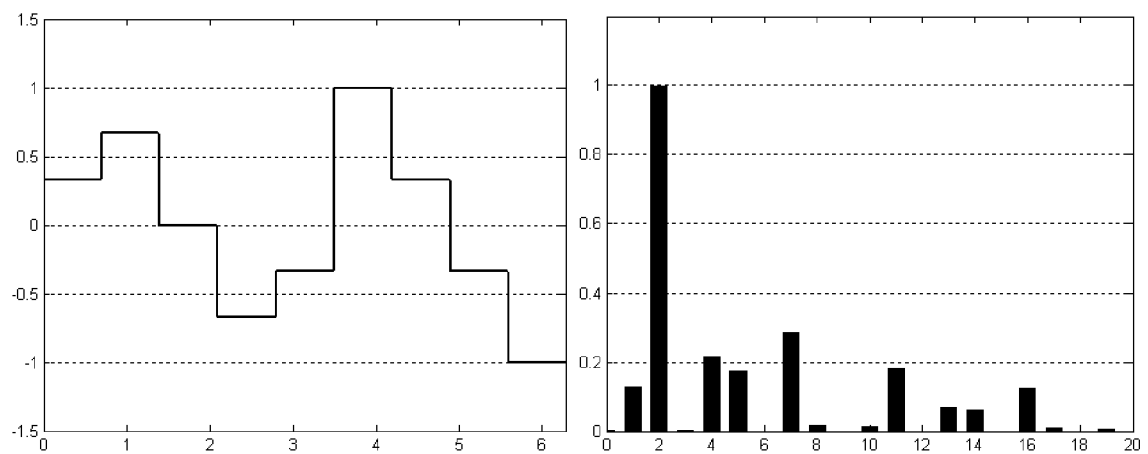


Fig. 8

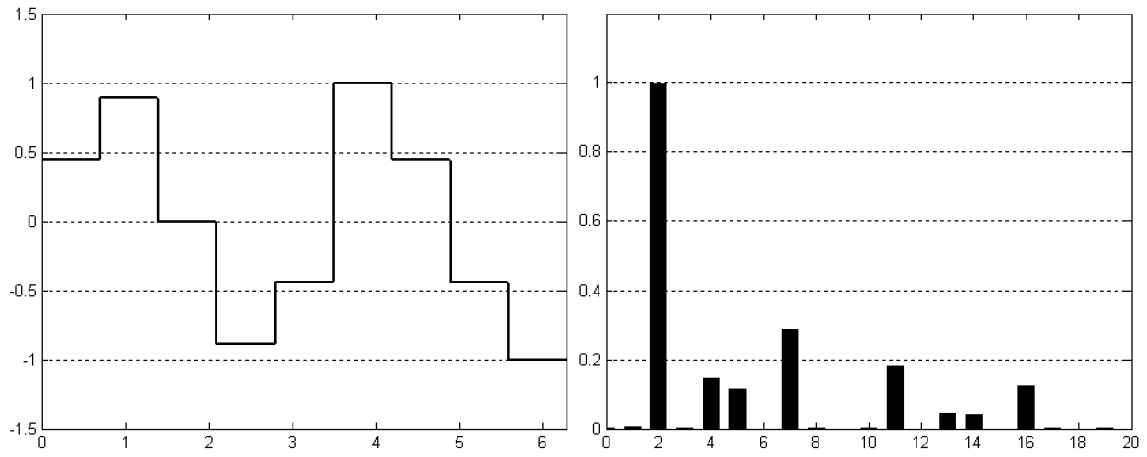


Fig. 9

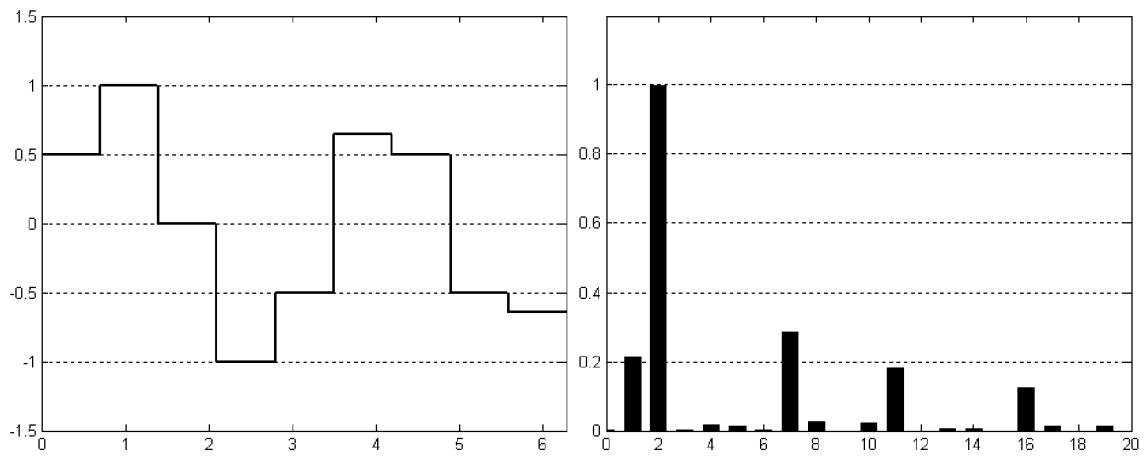


Fig. 10

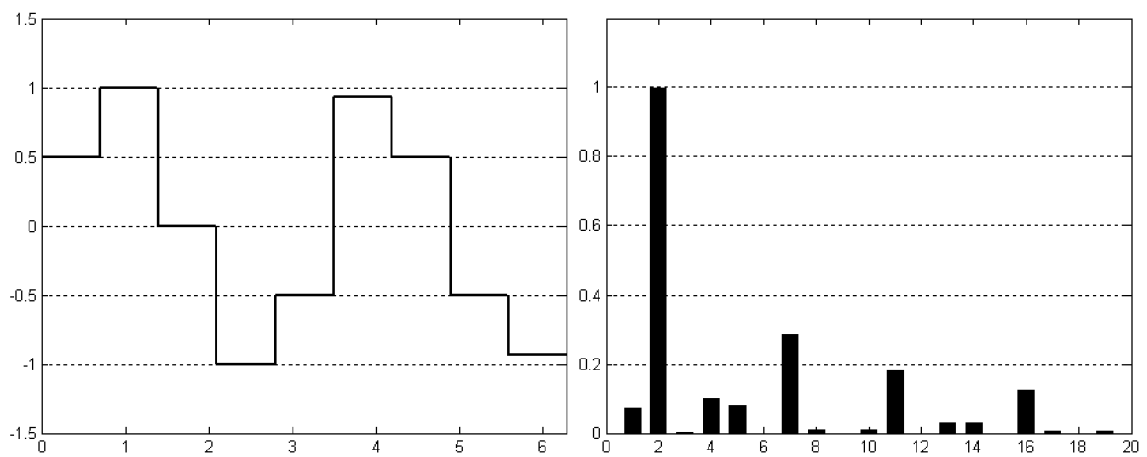


Fig. 11

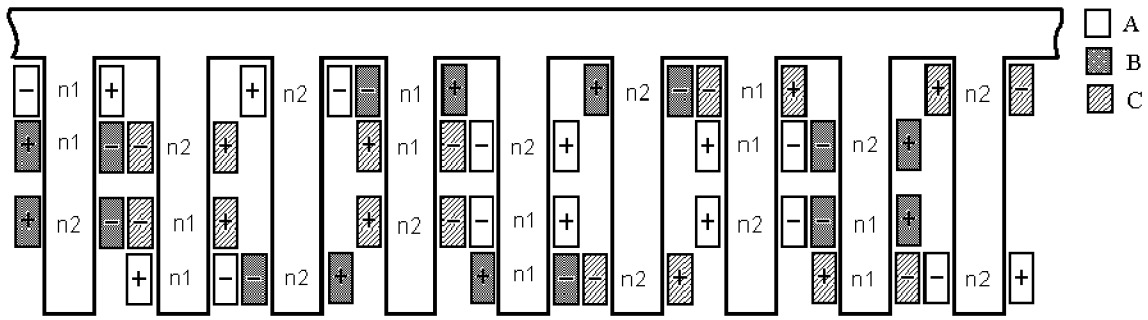


Fig. 12

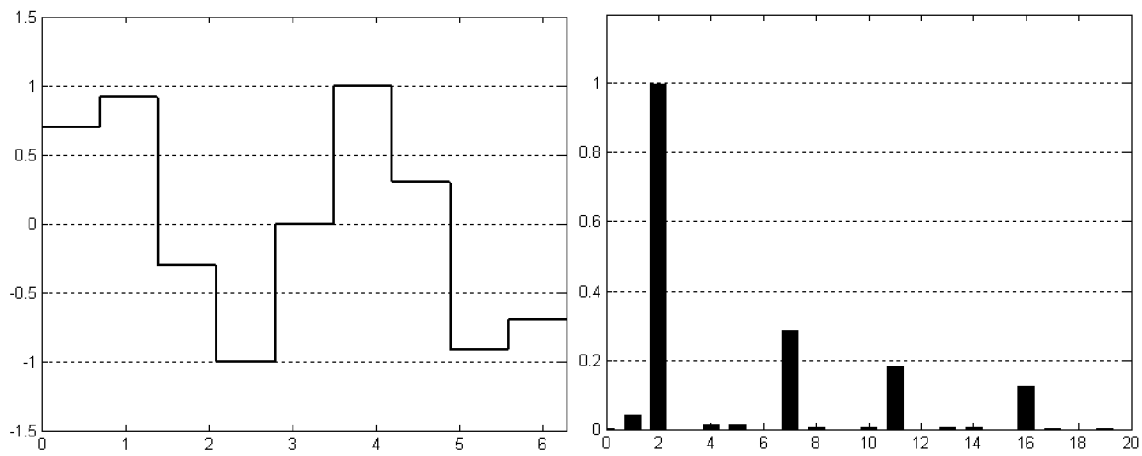


Fig. 13

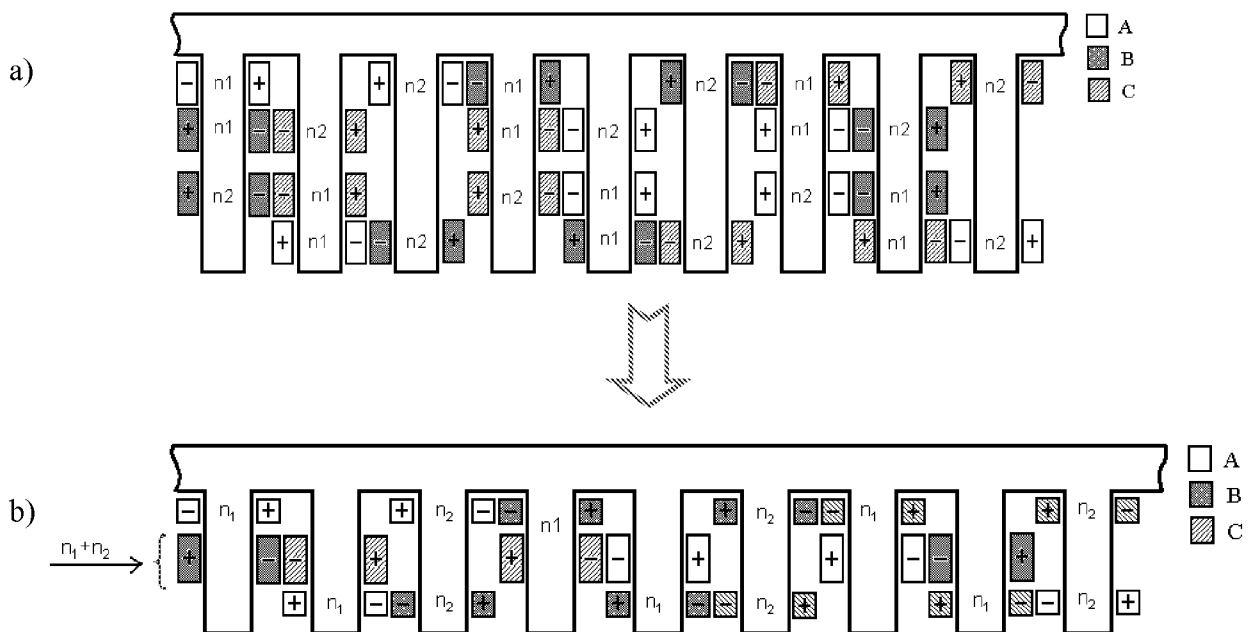


Fig. 14

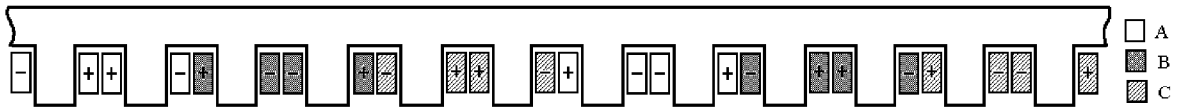


Fig. 15

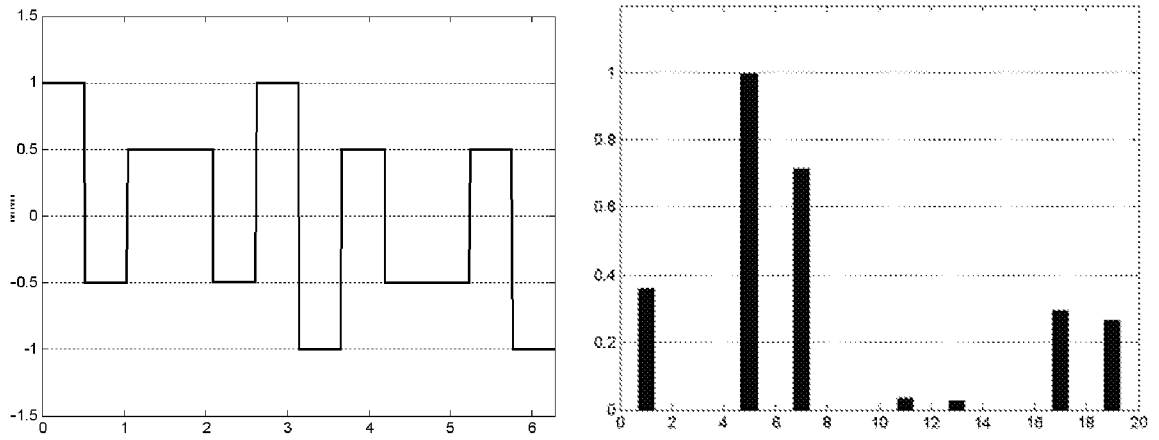


Fig. 16

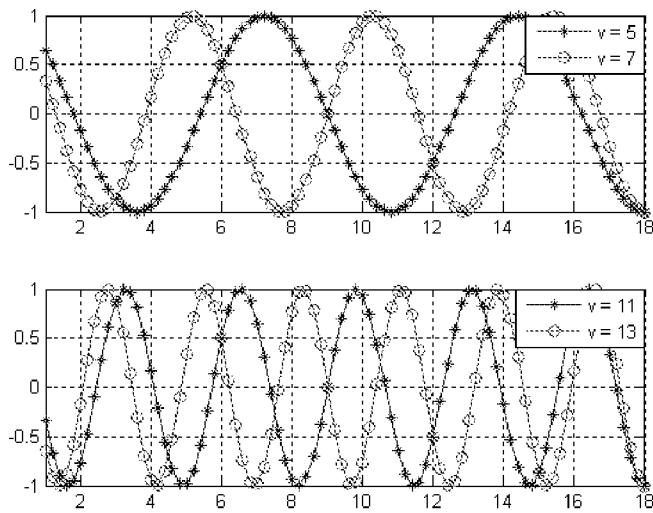


Fig. 17

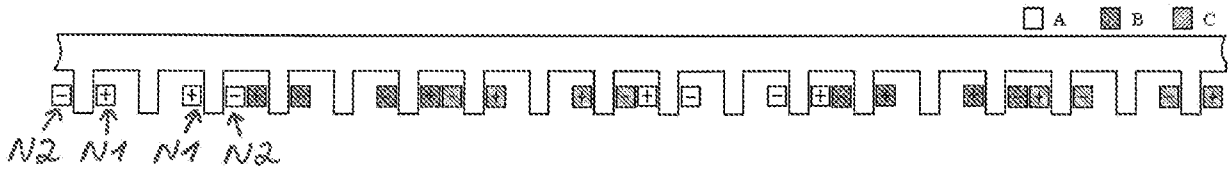


Fig. 18

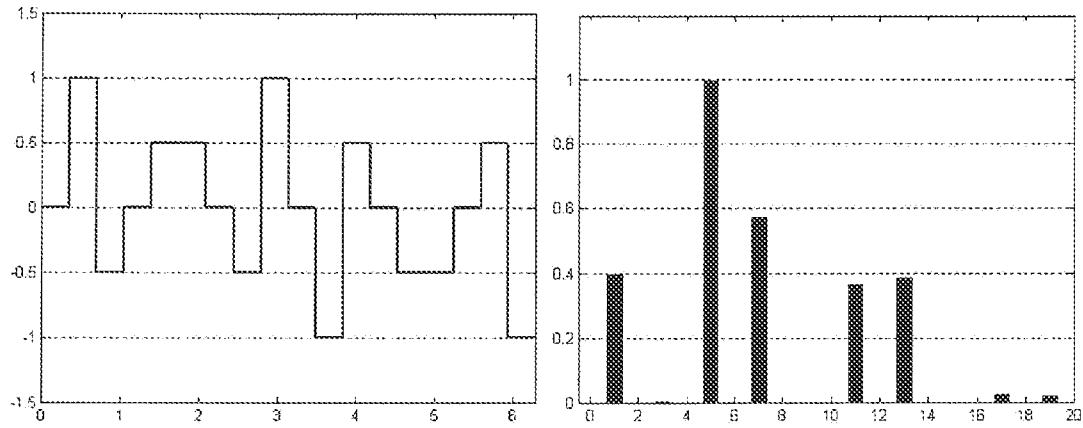


Fig. 19

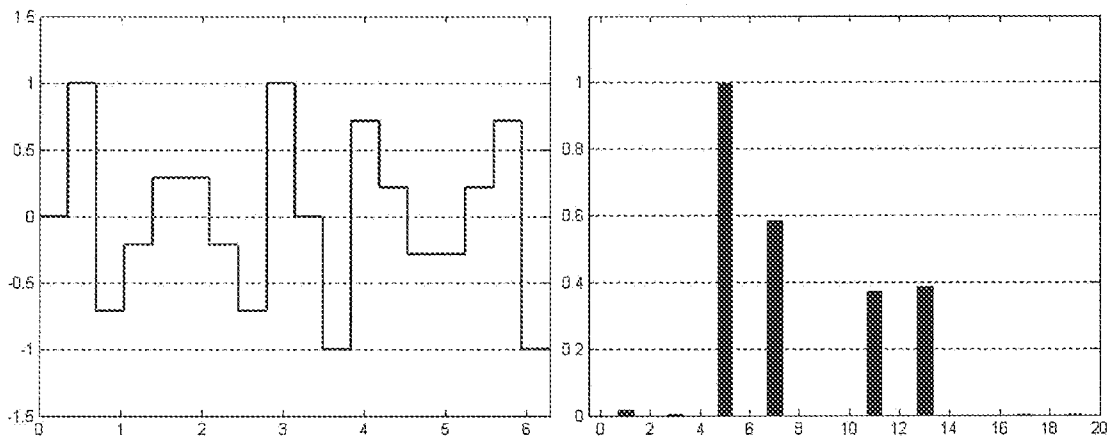


Fig. 20

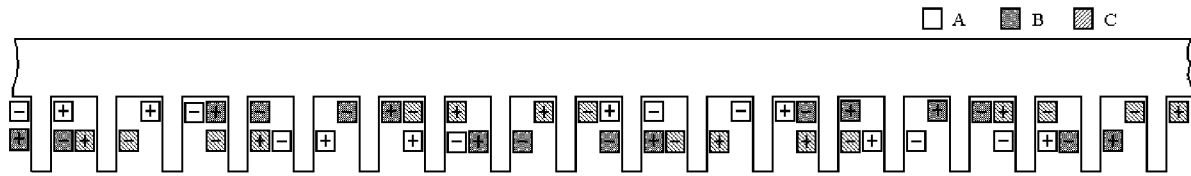


Fig. 21

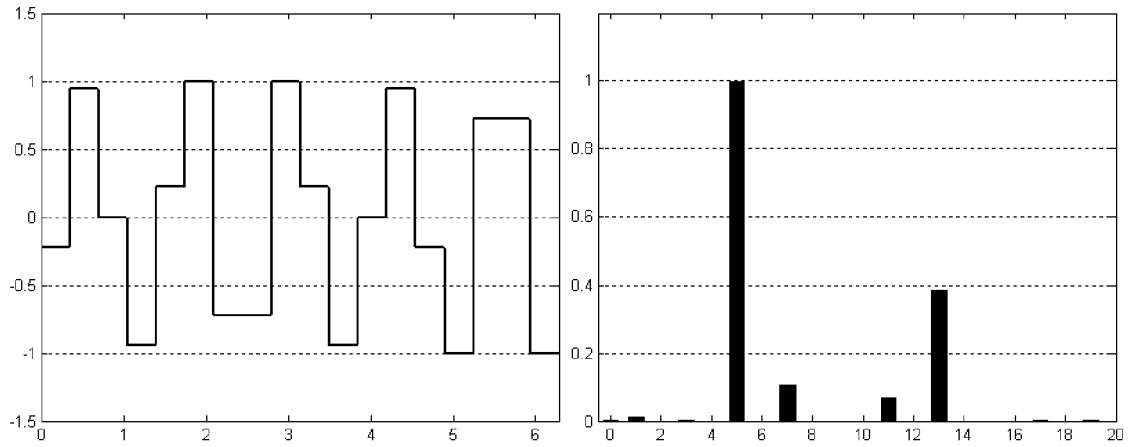


Fig. 22

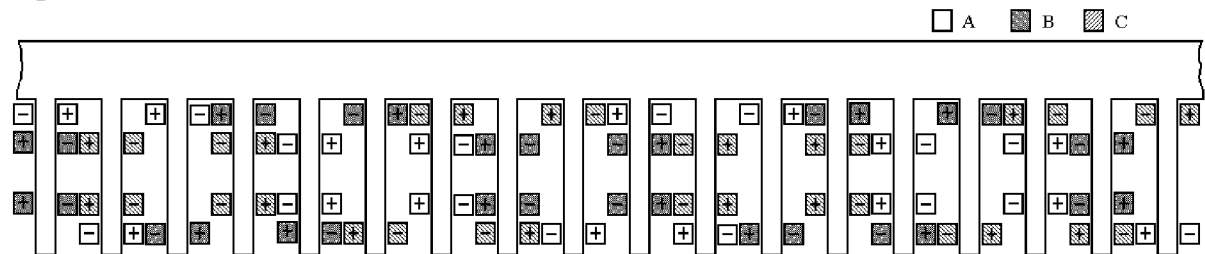


Fig. 23

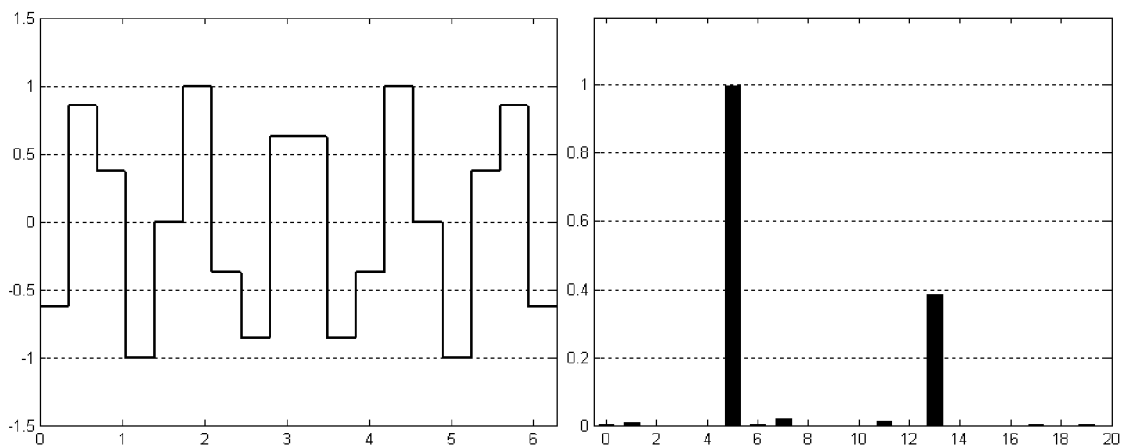


Fig. 24

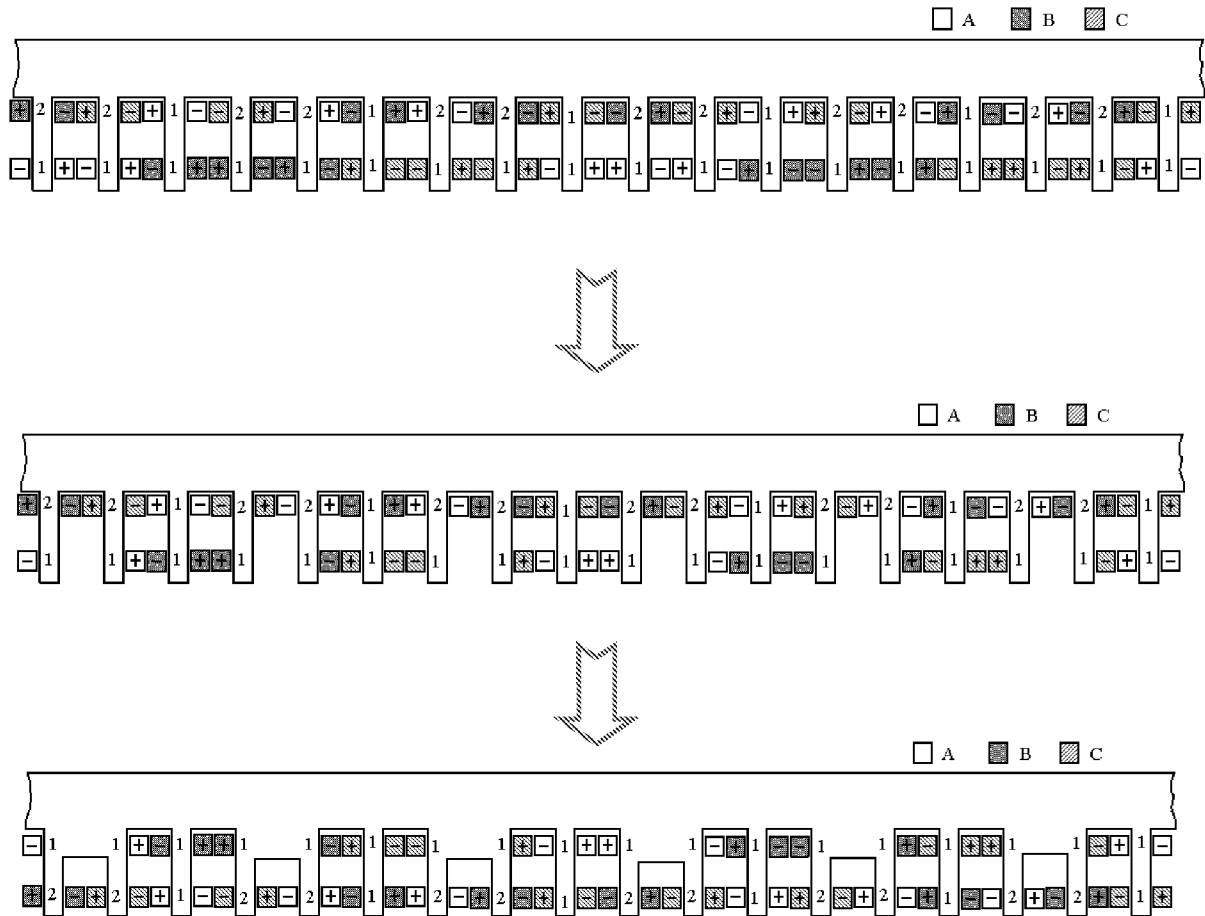


Fig. 25

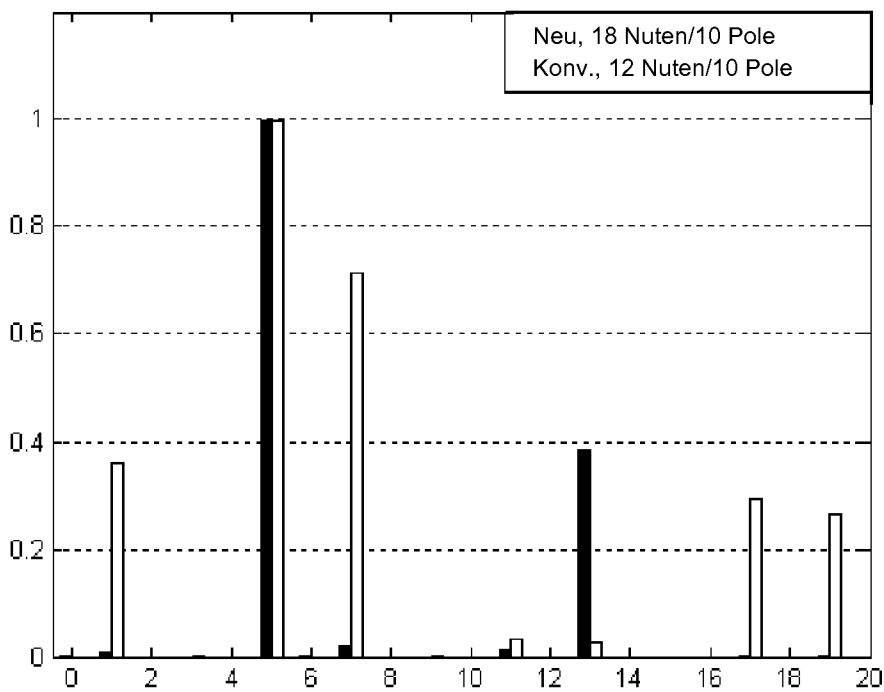


Fig. 26

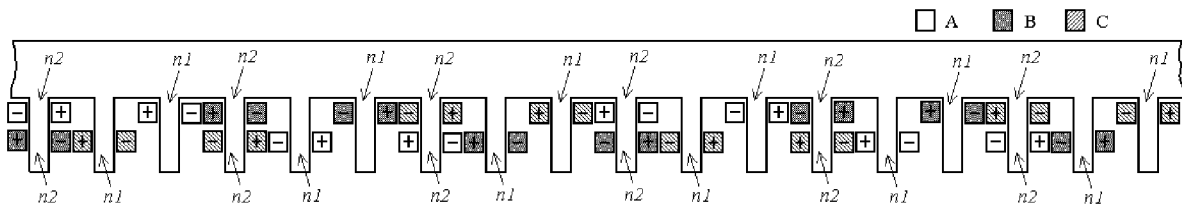


Fig. 27

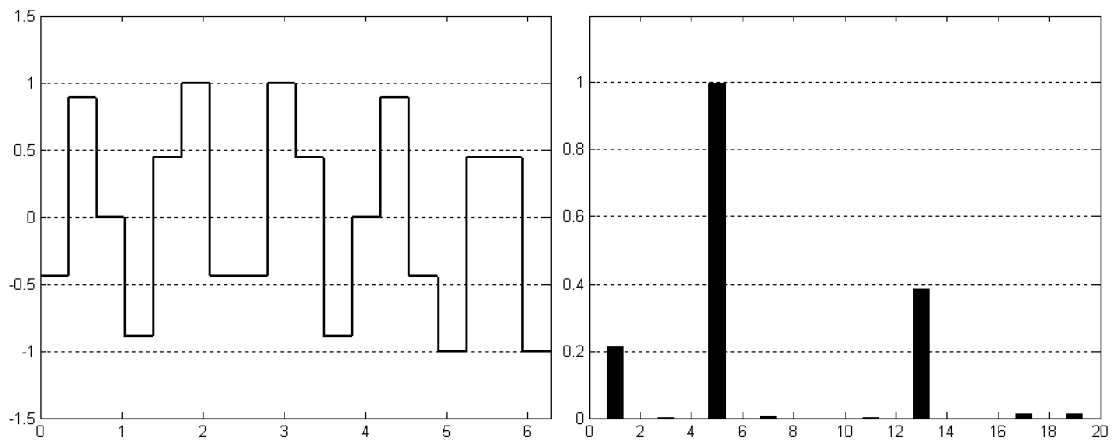


Fig. 28

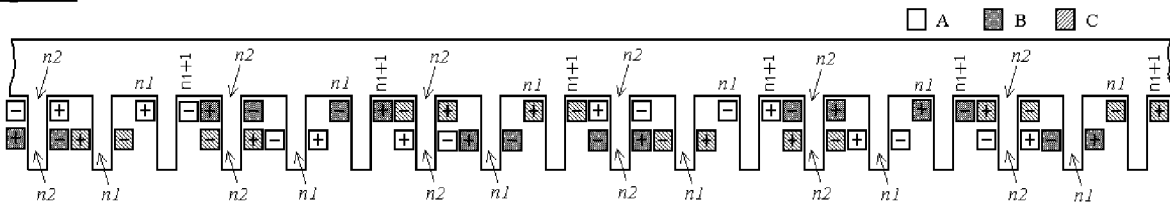


Fig. 29

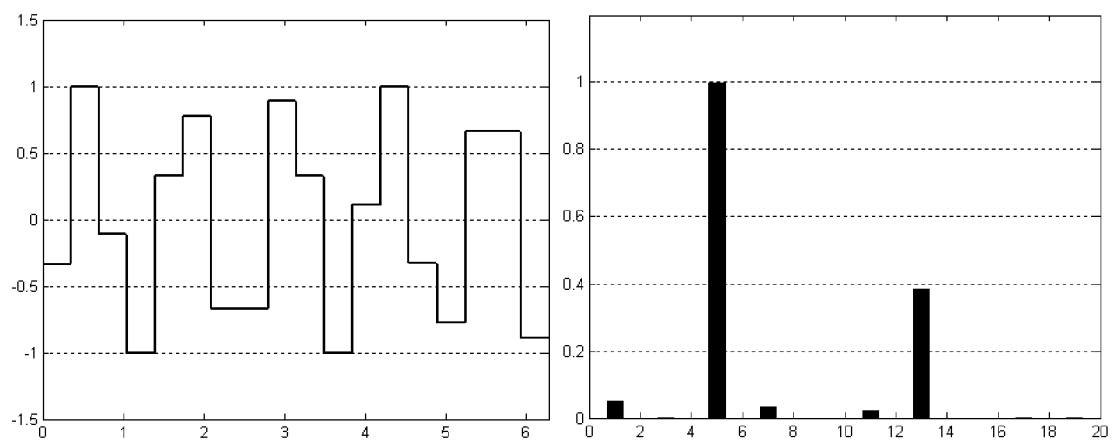


Fig. 30

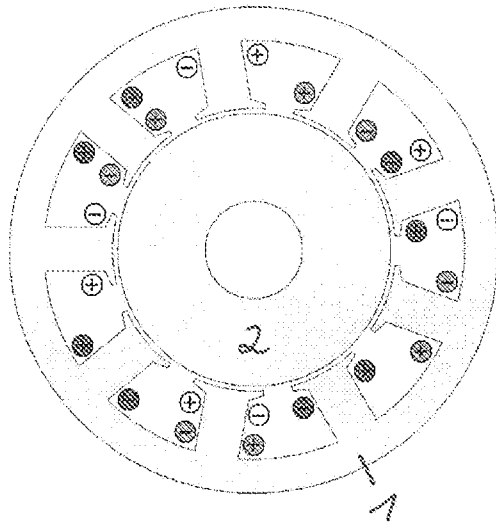


Fig. 31

