وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPEREUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعـة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كـلـيـة العـلـوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M……/GE/2025

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Réseaux Electrique en Electrotechnique

Présenté Par : FORLOUL ABDENNOUR
DJOURDEM HASSANE

Conception d'une Bobineuse automatique de transformateur monophasé

Soutenu le 23/12/2025 devant le jury composé de :

Président :	Mr. MISSOUM Ibrahim	MCB	Université de Mostaganem
Examinateur :	Mr. HENNI Sid Ahmed	MCB	Université de Mostaganem
Encadreur :	Mr. SOUAG Slimane	MCB	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025

Dédicace

Je dédie ce mémoire en premier lieu à mes parents, dont le soutien indéfectible, les sacrifices constants et les valeurs transmises ont profondément contribué à la construction de mon parcours académique et personnel. Leur confiance, leurs encouragements et leur patience ont été une source permanente de motivation tout au long de mes études.

Je dédie également ce travail à ma famille, pour son accompagnement moral, sa compréhension et sa présence continue durant les différentes étapes de ce parcours universitaire. Leur appui a joué un rôle essentiel dans le maintien de mon engagement et de ma persévérance face aux exigences de la recherche scientifique.

Cette dédicace s'adresse aussi à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail, par leurs conseils, leur soutien moral ou leurs encouragements. Qu'elles trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Enfin, je dédie ce mémoire à tous ceux qui croient en la valeur du savoir, de la rigueur scientifique et de l'effort académique, convaincu que la recherche constitue un levier fondamental pour le progrès et le développement.

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de thèse, M. Souag Slimane, pour son encadrement, son soutien constant, ses conseils avisés et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son expérience scientifique, sa disponibilité et ses orientations pertinentes ont été d'une aide précieuse et déterminante pour l'aboutissement de ce travail.

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail et pour l'intérêt qu'ils lui ont porté.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble des professeurs et au personnel du département de Génie Électrique, qui ont largement contribué à ma formation académique et scientifique, et qui m'ont offert un environnement d'apprentissage stimulant et enrichissant.

Mes remerciements s'adressent aussi à ma famille, pour son soutien indéfectible, sa patience et ses encouragements permanents. Leur présence bienveillante a constitué une source essentielle de motivation tout au long de mon parcours universitaire.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à tous mes amis et collègues pour leur aide, leurs échanges constructifs, leurs encouragements et les moments partagés, qui ont rendu cette période de travail à la fois enrichissante et agréable.

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception et la réalisation d'une bobineuse automatique destinée à la fabrication de transformateurs monophasés. L'objectif principal est de développer un système automatisé capable d'assurer un enroulement précis, régulier et reproductible des bobines, tout en réduisant le temps de production, l'effort humain et les erreurs liées au bobinage manuel.

La première partie du travail est consacrée à une étude théorique des transformateurs monophasés, incluant leur principe de fonctionnement, les types d'enroulements, les contraintes mécaniques et électriques, ainsi que les paramètres influençant la qualité du bobinage (tension du fil, pas d'enroulement, vitesse de rotation et nombre de spires).

La seconde partie traite de la conception mécanique de la bobineuse automatique, comprenant le choix des matériaux, la structure du châssis, le système de guidage du fil et le mécanisme de rotation du mandrin. Une attention particulière est portée à la robustesse, à la précision du déplacement linéaire et à l'adaptabilité du système à différents types et dimensions de transformateurs.

Enfin, La troisième partie est dédiée à la conception du système électrique et électronique de commande, basée sur l'utilisation de moteurs pas à pas, de drivers de puissance et d'un contrôleur programmable. Un algorithme de commande est développé afin de synchroniser la rotation du mandrin avec le déplacement du guide-fil, permettant un enroulement uniforme et contrôlé. Une interface utilisateur simple est également proposée pour le réglage des paramètres de bobinage.

Ce travail constitue ainsi une contribution pratique à l'automatisation des procédés de fabrication des transformateurs monophasés et ouvre des perspectives d'amélioration vers des systèmes plus intelligents et polyvalents.

LE SOMMAIRE

Dédicace

Remerciements

Résume …… …… ……..….... 4

SOMMAIRE …… ……. ….... 5

LISTES DE FIGURES…… …….. 7

Introduction générale.…… …… 10

Chapitre 1 : Généralités

1- Introduction ……...…11
2-1- Bobineuse manuelle……..…..11
2-2- Bobineuse semi-automatique…….12
2-3-Bobineuse automatique. …….13
3- Parties mécanique de bobineuse ……...…14
3-1-le mandrin. ……..14
32. Le guide fil ……...…15
3.3. System de tension de fil. ……16

3-4. Le compteur de tour. ……...…17
3-5-le support……18.....

18.....Conclusion

Chapitre 2 : Etude théorique des transformateurs monophasés

Introduction ……18

1-1- présentations d'un transformateur……..…18

1-2- utilisation d'un transformateur ……..18

1-3- contusion d'un transformateur mono phase……...…19

1-3-1- le circuit magnétique……...…19

1-3-2- les enroulements électrique……20

1-4- rôle…….21

1-5-principe de fonctionnement d'un transformateur……...…21

2-les calcules :

1- Les formules ……21
2- Application numérique ……23

26..... Conclusion

Chapitre 3 Conception mécanique et électrique de Bobineuse.

Introduction ……28

Partie mécanique

1-la conception 3D sur solide Works. ……28

Modélisation de la bobineuse……28

1-Présentation de SolidWorks……28

2-Design de la machine. ……28

Partie électrique (Matériel.) ……36

1-schema électrique……36

programme de Arduino ……37.....

2-la définition des composants électrique ……39

2-1- les moteurs et drivers de moteur……39

2-1-1. Nema 23 moteur pas a pas…… 39
2-1-2-driver moteur Pas a Pas……40
2-1-3-alimentation ……42.....
2-4-4. Arduino uno……42.....

PARTIE MECANIQUE

1-Matériel ……44.....
1-1 guidage linéaire ……44
1-2-bloc convertisseur……45
1-3-vise trapézoïdale T8. ……45
1-4-coupleur d'arbre flexible……46
2 Montage de moteur pas a pas avec l'Arduino uno ……47
3- Montage de boutons poussoirs avec l'Arduino uno 47

4. Montage de l'écran LCD avec Arduino ……48

Mécanisme de fonctionnement ……48

Conclusion ……49

Chapitre 4 : Tests, Résultats de Simulation et Discussion

1. Introduction ……52

2. Environnement de test et de simulation …….52
2.1 Matériel de commande et de puissance …..…….52
2.2 Interface utilisateur ….…….53
2.3 Environnement logiciel de simulation …….53
2.4 Paramètres testés …….54
2.5 Organigrammes et schéma bloc du système …….55
3. Tests de l'interface utilisateur……55
3.1 Test du menu de réglage …….55
3.2 Test du bouton START …….56
4. Tests de synchronisation mandrin / guide-fil …….56
4.1 Principe de synchronisation …….56
4.2 Résultats de simulation…… …….56
5. Tests du calcul automatique des couches …….57
6. Tests de l'affichage en cours de bobinage …… …….57
7. Test de fin de cycle et retour au menu ……..…….57
8. Analyse globale des résultats …….57
Discussion…….…….57
1. Objectifs et portée de la discussion scientifique …….57
2. Analyse de l'architecture de commande …….57
2.1 Choix d'une commande numérique centralisée …..…….58
2.2 Approche séquentielle de l'algorithme …….58
3. Synchronisation mandrin – guide-fil …….58
3.1 Précision de la synchronisation ……58
3.2 Limites de la commande en boucle ouverte…….58
4. Analyse de l'interface homme-machine (IHM) …….58
4.1 Ergonomie et simplicité …… …….59
4.2 Robustesse de l'IHM …… …….59
5. Discussion sur la partie électronique …….59
5.1 Séparation commande / puissance ..…….59

5.2 Validation par simulation Proteus ..…….59

6. Apports scientifiques et techniques du travail …...…….60

7. Limites du système développé ……..61

8. Perspectives d'amélioration et travaux futurs …….62

9. Conclusion …….. ….…….63

CONCLUSION GENERALE ……..…….64

Bibliographie ……65

Liste de figures :

Figure 1 bobineuse manuelle 13
Figure 2 bobineuse auto 15
Figure 1 Carcasse d'un transformateur monophasé 23
Figure 2 différentes formes des tôles magnétiques 23
Figure 1 NEMA23 moteurs pas-a- pas avec connecteurs et câble 1m 57HS76-3004A08-D21 33
Figure 2 Arduino uno Rev3-DIP 34
Figure 3 driver moteur PAS A PAS –M545D 35
Figure 4 alimentation 24 v 10A 240 w 35
Figure 5 guidage linéaire 36
Figure 6 bloc convertisseur carre pour T8 écrou 36
Figure 7 vise san fin 37
Figure 8 écrou en laiton 37
Figure 9 coupleur d'arbre flexible en aluminium 8*8*25mm 37
Figure 10 bobineuse auto 38
Figure 11 MACHINE COMPLET 38
Figure 12 : schémas électriques 39
Figure: organigramme 38

Figure 13 NEMA23 moteurs pas-a- pas 44
Figure 14 driver moteur PAS A PAS –M545D 45
Figure 15 alimentation 24 v 10A 240 w 46
Figure 16 Arduino uno Rev3-DIP 47
Figure 17 guidage linéaire 49
Figure 18 bloc convertisseur carre pour T8 écrou 49
Figure 19 vise trapézoïdale T8*500mm avec écrou en laiton 50
Figure 20 coupleur d'arbre flexible en aluminium 8*8*25mm 50
Figure 21 Montage de moteur pas a pas avec l'Arduino uno 51
Figure 22 branchement simplifier d'un Arduino avec 4 boutons poussoir 51
Figure 23 Branchement simplifier d'un Arduino avec l'écran LCD 52

Introduction générale :

Les transformateurs monophasés occupent une place essentielle dans les systèmes électriques modernes, notamment dans les domaines de la distribution d'énergie, de l'électronique de puissance, de l'automatisation industrielle et des applications domestiques. Leur rôle principal consiste à adapter les niveaux de tension et de courant tout en assurant une isolation électrique fiable entre les circuits. La performance, la fiabilité et la durée de vie d'un transformateur dépendent en grande partie de la qualité de ses enroulements, appelés bobinages.

Traditionnellement, le bobinage des transformateurs était réalisé de manière manuelle ou semi-automatique, ce qui rendait le processus long, répétitif et fortement dépendant du savoir-faire de l'opérateur. Cette méthode présente plusieurs limites, notamment une faible précision dans le nombre de spires, une tension de fil non uniforme, un risque accru d'erreurs humaines et une productivité limitée. Avec l'augmentation des exigences industrielles en matière de qualité, de rendement et de répétabilité, ces contraintes ont conduit au développement de solutions automatisées.

Les bobineuses automatiques de transformateurs monophasés ont ainsi été conçues pour répondre à ces besoins. Ces machines permettent de réaliser le bobinage des enroulements primaire et secondaire de manière précise, rapide et contrôlée. Elles utilisent généralement des systèmes motorisés (moteurs pas à pas ou servomoteurs), des dispositifs de guidage du fil, des capteurs de tension et des unités de commande programmables telles que les microcontrôleurs ou les automates industriels. L'automatisation assure un contrôle rigoureux du nombre de spires, de la vitesse de bobinage, de la répartition des couches et de la tension appliquée au fil conducteur.

L'utilisation de bobineuses automatiques présente plusieurs avantages majeurs, notamment l'amélioration de la qualité des enroulements, la réduction des défauts mécaniques et électriques, l'augmentation de la productivité et la standardisation du processus de fabrication. De plus, ces machines offrent une grande flexibilité, permettant l'adaptation à différents types de transformateurs monophasés, à diverses sections de fils et à plusieurs configurations de bobinage.

Dans un contexte industriel marqué par la transition vers l'automatisation et l'industrie 4.0, les bobineuses automatiques constituent une solution incontournable pour la fabrication moderne des transformateurs. Elles contribuent non seulement à optimiser les performances électriques des dispositifs, mais également à réduire les coûts de production et à améliorer la sécurité des opérateurs. Ainsi, l'étude et la conception des bobineuses automatiques de transformateurs monophasés représentent un axe important de recherche et de développement en électrotechnique et en mécatronique.

Chapitre 1

Généralités

1 Introduction :

Une bobineuse est une machine industrielle utilisée pour enrouler un matériau souple enroulé sur des rouleaux afin de le transformer en bobines plus petites et de largeur spécifique. On l'utilise dans diverses industries pour des matériaux tels que le papier, les feuilles, les fils, ou les câbles, afin de les préparer pour l'utilisation ou le transport. Les bobineuses sont équipées de systèmes pour le déroulement, la coupe (le refendage), l'enroulement et le contrôle de la tension du matériau.

Au Moyen Âge, les bobineuses sont devenues plus complexes, avec l'ajout de mécanisme pour faciliter l'enroulement du fil. Ces mécanismes comprenaient des dispositifs de tension pour maintenir une tension constante sur le fil, et des dispositifs de positionnement pour déplacer la bobine à la position souhaitée. Au 19ème siècle, les bobineuses ont été mécanisées, avec l'ajout de moteurs pour entraîner le fil. Cette innovation a permis d'accroître la productivité et la précision du bobinage.
Au 20ème siècle, les bobineuses ont continué à évoluer avec l'ajout de technologies telles que la commande numérique par ordinateur (CNC). Ces technologies ont permis de rendre les bobineuses plus flexibles et plus faciles à utiliser. Les bobineuses les plus récentes sont des Machines sophistiquées, capables de réaliser des opérations de bobinage complexes. Elles sont Essentielles pour de nombreuses industries telles que les industries d'automobile, industries d'électronique et industries textile. Dans l'industrie électrique, les bobineuses sont couramment utilisées pour enrouler les bobines des moteurs, des transformateurs, des inductances et des selfs.
Il existe 3 types de bobineuse :

- Les bobineuses manuelles.
- Les bobineuses semi-automatiques.
- Les bobineuses entièrement automatiques.

Leurs utilisations dépendent essentiellement des produits demandés.

2-LES TYPES DE BOBINEUSE

2.1 Bobineuse manuelle :

Une bobineuse manuelle est un appareil qui permet d'enrouler de la matière souple, comme du fil de laine, du câble ou du papier, de manière organisée et sans nœuds, pour former une bobine. Elle est actionnée par l'utilisateur, sans moteur électrique, et sert à simplifier et fluidifier les processus de tricot, de tuf Ting, ou de préparation pour l'enroulement de fils électriques.
La première technologie de bobineuse de l'histoire est une technologie manuelle, les bobineuses étant actionnées manuellement par les hommes et les sources 18 naturelles telles que l'eau et le vent. Elle est simple, facile à construire, bon marché et ne nécessite pas d'énergie électrique.
Pour faire fonctionner la machine à bobiner manuelle par l'homme, les utilisateurs contrôlent la broche et alimentent le matériau. La tension du fil peut être contrôlée en augmentant la friction entre le fil et la main.
Les bobineuses manuelles sont généralement utilisées pour les petits travaux. Elles sont généralement actionnées à la main ou disposent d'un dispositif d'entrainement du bobinage, commandé par une pédale.
Les machines à bobinage manuelles sont dotées d'un noyau sur une broche et d'une poignée, d'une tige ou d'une bobine et d'engrenages. La vitesse de la machine à

bobiner peut-être réglée en changeant le rapport d'engrenage. Elle peut atteindre jusqu'à 9000 tours par minute, mais cela dépend de la capacité de l'homme.
La bobineuse manuelle contient un compteur mécanique pour vérifier le nombre de tours, ce qui la rend plus pratique qu'auparavant. Cependant, elle prend toujours beaucoup de temps lorsqu'un gros transformateur est nécessite un grand nombre de tours. Dans les industries actuelles, la machine à bobiner manuelle est encore utilisée, mais seulement pour une production relativement faible de bobines de solénoïdes, de bobines à plusieurs sections et d'autres bobines complexes que les machines automatiques ne peuvent pas créer, ou qu'elles peuvent créer, mais seulement avec des capteurs très couteux et un ordinateur programmé avec précision. [1]

Figure 1 bobineuse manuelle [2]

2.2 Bobineuse semi auto :
Une **bobineuse semi-automatique** est une machine industrielle qui enroule du fil, des câbles, des films ou d'autres matériaux souples sur une bobine, mais nécessite une **intervention humaine** pour certaines tâches, contrairement à une machine entièrement automatique. Elle combine l'automatisation de processus clés, comme le comptage et le réglage du couple, avec la nécessité d'une supervision ou d'une manipulation de la part de l'opérateur pour des étapes telles que le positionnement ou la finition du produit.
Les bobineuses semi-automatiques sont composées de moteurs et d'un panneau de commande qui permet d'enrouler le fil automatiquement en fonction d'un certain nombre d'entrées, mais la taille des bobines ou les premières positions doivent être mesurées, calculées et insérées par les opérateurs avant que la machine ne soit mise en service. Il s'agit d'une limitation de la machine à bobiner semi-automatique.
Cependant, malgré tous ces faits, les machines à bobiner semi-automatiques sont les machines à bobiner les plus courantes et les plus populaires. En effet, ces machines sont manifestement plus puissantes et beaucoup plus rapides que les machines à bobiner manuelles et qu'elles répondent à des exigences de production plus élevées, elles sont en même temps relativement plus petites, plus légères et moins chères que les machines entièrement automatiques. [1]

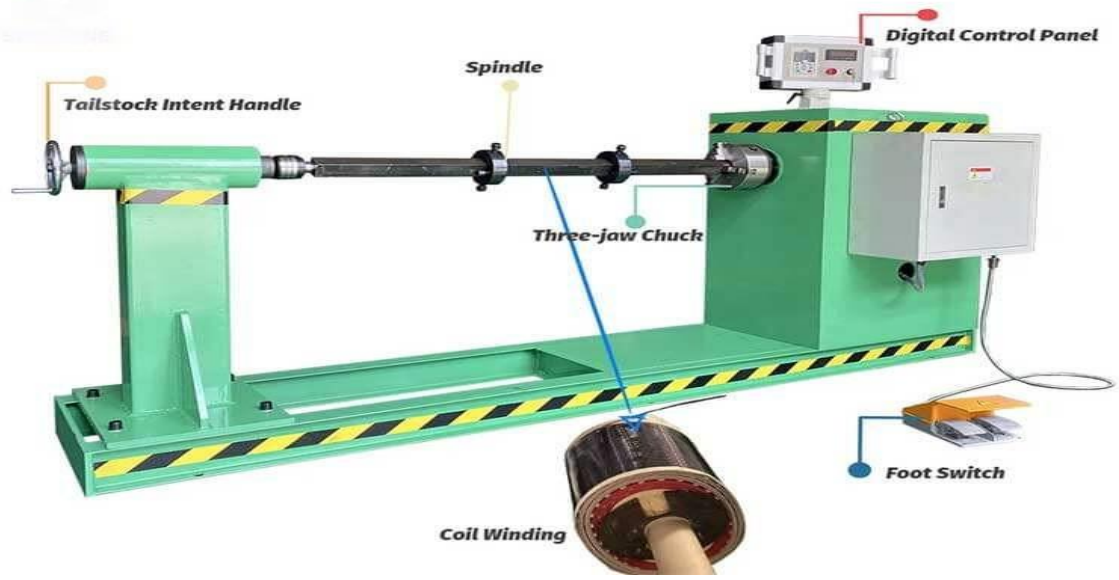


Figure 2 bobineuse semi auto

2.3Bobineuse automatique :

Une **bobineuse automatique** est un équipement automatisé qui enroule automatiquement et séquentiellement du fil, des bandes de papier, des fibres ou d'autres matières souples sur une bobine ou un mandrin, selon des motifs géométriques précis. Ces machines sont programmables et offrent une grande précision pour la fabrication de composants complexes, comme les transformateurs ou les enroulements de moteurs, en contrôlant le nombre de tours, la largeur et la vitesse.

Le nom lui-même indique que la technologie d'enroulement sera entièrement automatique avec seulement quelques interventions de l'opérateur. Aujourd'hui, la seule raison de choisir des bobineuses entièrement automatiques, c'est la conception d'une seule bobine avec un volume important. La plupart des bobineuses entièrement automatiques sont commandées par CNC.

Elles contiennent de nombreux types de capteurs pour mesurer ou calculer le résultat souhaité.

En général, l'ordinateur a déjà une liste des produits. La sélection d'un produit après l'insertion d'une bobine n'est donc qu'une tâche qui est effectué manuellement par l'opérateur.

Il mesurera automatiquement la longueur de la bobine insérée et règlera le nombre de tours qui dépend de la longueur de la bobine et le nombre de tours qui dépendent du produit sélectionné ; ce qui donne un résultat parfait. Mais avant de faire fonctionner la machine, une matière première spéciale, utilisée dans les bobines, doit être prise en compte et utilisée car tout type de fil de cuivre ne peut être utilisé pour la fabrication de bobines. Des fils de mauvaises qualités ne seraient pas acceptés et le fil pourrait se casser. [3]

Figure 2 bobineuse auto [4]

3. Parties mécaniques d'une bobineuse

Au départ, les bobinages étaient réalisés manuellement, ce qui était une tâche laborieuse
Et répétitive. La création des bobineuses a permis de mécaniser ce processus et de le rendre plus Efficace. Les parties mécaniques des bobineuses ont été créées pour reproduire les gestes Manuels de l'homme lors du processus de bobinages. Grâce à des optimisations, certaines Améliorations de différents systèmes composants
Les bobineuses ont été faites, tout en gardant Les principes des bobinages.
Les principaux composants mécaniques d'une bobineuse sont :

- Le mandrin
- Le guide de fil
- Le système de tension de fil
- Le compteur
- Le support

Ces composants sont indispensables car chacun d'eux tient les rôles les plus importants lors du
Processus de bobinage. Par ailleurs, d'autres composants peuvent apparaître dans certaines
Bobineuses tels que les capteurs de tensions de fil, des systèmes de refroidissement, des
Systèmes de découpages automatiques, etc.

3-1. Le mandrin

Le mandrin d'une machine de bobinage est la partie où l'on place le noyau de la bobine
A enrouler ; que ce soit une bobineuse manuelle ou automatique. Son rôle principal est de tenir Fermement le noyau.

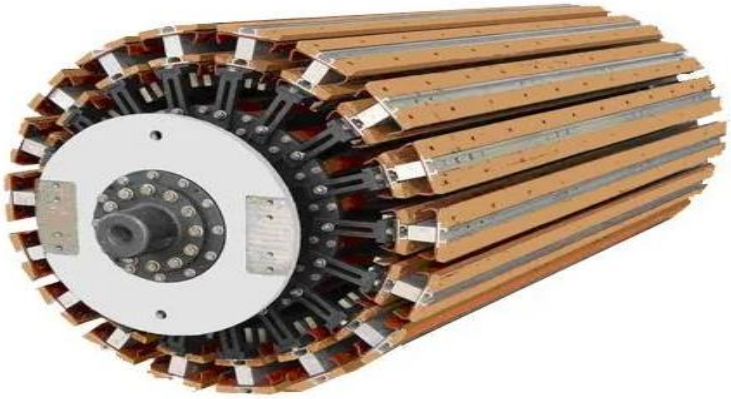


Figure 3 Le mandrin [5]

3-2Le guide fil

Le guide fil est utilisé pour guider le fil pendant le processus d'enroulement. Ils sont importants

Pour éviter que le fil ne s'emmêle pendant l'enroulement. De plus, il permet à l'enroulement de

S'aligné correctement le long du noyau de la bobine, comme illustré dans la Figure5

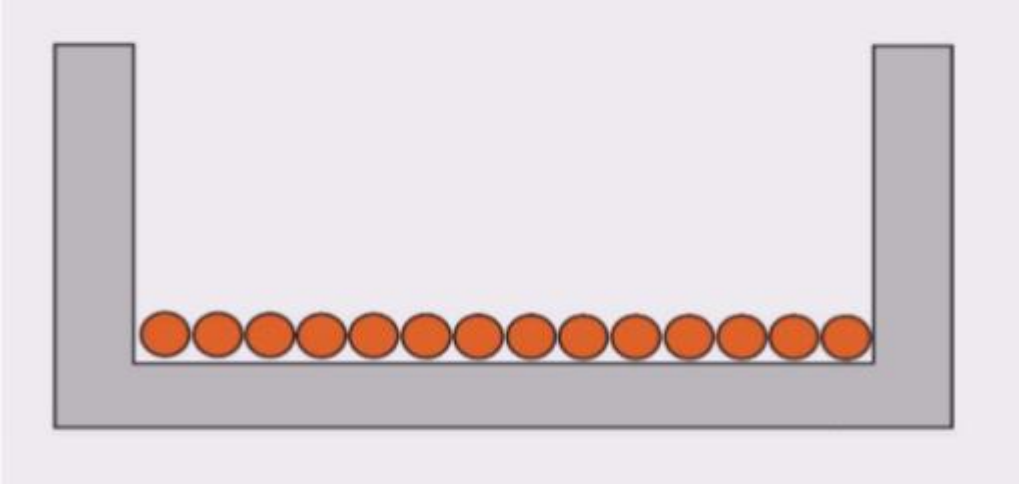


Figure 4 : Alignement des fils sur la bobine

Dans la Figure 6, la tige filetée est utilisée pour un mouvement axial. Son

Fonctionnement est le même que celui de la vis sans fin. Le chariot est conçu pour glisser sur Les lignes de guidage pour couvrir la longueur de l'arbre. Le mouvement linéaire du chariot Permet un enroulement régulier sur la longueur de l'armature, c'est-à-dire le noyau de la bobine.

Il comporte quatre trous pour le roulement linéaire, qui est utilisé pour un mouvement de Glissement sans frottement sur l'arbre de guidage [6]

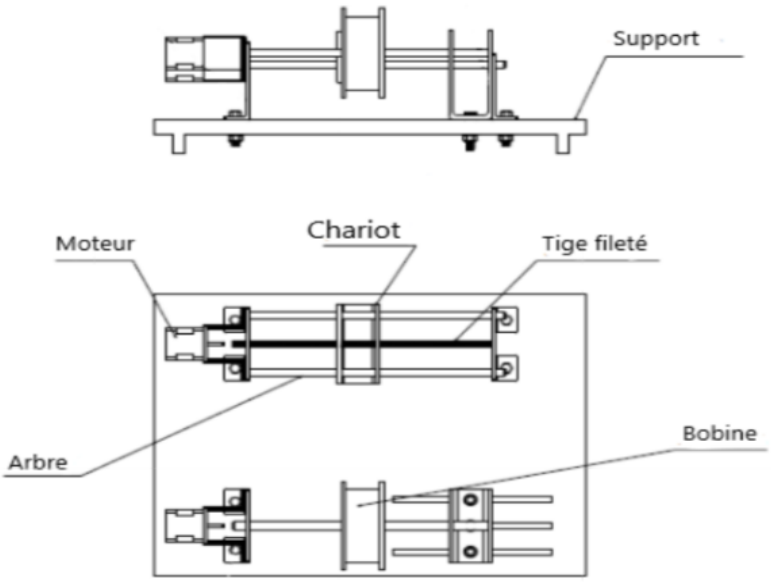


Figure 5 dessin d'un projet de machine de bobinage [6]

3-3. Système de tension de fil

Dans un processus de bobinage typique d'un système automatique de bobinage de Moteurs, le fil émaillé est entrainé par le rouleau de rembobinage. Sans un contrôle adéquat de La tension du fil, il n'est pas possible d'obtenir un enroulement soigné du fil émaillé [7]. Les Systèmes de tension des fils sont utilisés pour maintenir une tension constante sur le fil pendant Le processus d'enroulement. Ils sont importants pour éviter que le fil ne se déroule ou ne se Torde pendant l'enroulement.

Dans la Figure 2-8, la machine de bobinage est équipée d'un système de tension de fil Munie de plusieurs poulies. Le système de tension du fil est directement posé sur le chariot de Guide fil de la machine

Figure 6 Système de tension de fil [8]

3-4. Le Compteur de tour :

Le compteur de tour, comme son nom l'indique, est le dispositif qui mesure le nombre

De tours effectués par la bobineuse. Il est utilisé pour surveiller le processus d'enroulement. Les Compteurs de tour sont disponibles pour les bobineuses manuelles, semi-automatiques et Entièrement automatiques

Les Types de capteurs utilisés dans les bobineuses automatiques :

1. Capteur optique :

Fonction : Détecte le passage du fil via un faisceau lumineux.

Avantages : Précis, fiable, peu coûteux.

Utilisation courante : Le plus utilisé dans les bobineuses automatiques.

2. Capteur magnétique :

Fonction : Utilise un aimant pour détecter le champ magnétique généré par le passage du fil.

Avantages : Précis et fiable.

Inconvénient : Plus coûteux que le capteur optique.

3. Capteur à ultrasons :

Fonction : Utilise des ondes sonores pour détecter la réflexion provoquée par le fil.

Avantages : Précis.

Inconvénients : Plus coûteux et complexe ; moins utilisé.

Rôle du contrôleur :

Reçoit les données numériques du CAN.

Calcule le nombre de tours du fil.

Affiche le résultat sur un écran (LCD ou afficheur 7 segments).

3-5. Le support :

Le support est la partie sur laquelle tous les autres composants de la machine sont posés et fixés.

Conclusion :

Une bobineuse est ainsi un appareil très efficace permettant des enroulements rapides et précis. Grâce à son évolution au fil du temps, elle a pu être utilisée dans plusieurs domaines Eventuellement dans celui de l'industrie électrique. Le bobinage de transformateur peut donc Être effectué grâce à des bobineuses. Pour réaliser des enroulements corrects, les bobineuses Sont donc composées principalement de mandrin, de système de tension de fil, de guide de fil Et de compteur de tour.

Chapitre 2

Etude théorique des transformateurs monophasés

Introduction :

Les transformateurs monophasés de basse puissance occupent une place essentielle dans de nombreuses applications électriques et électroniques, notamment dans les alimentations, les systèmes de commande, les appareils domestiques et les équipements industriels de faible puissance. Leur rôle principal consiste à adapter les niveaux de tension et de courant tout en assurant une isolation électrique entre les circuits primaire et secondaire, garantissant ainsi la sécurité et la fiabilité des installations.

La conception d'un transformateur monophasé de basse puissance repose sur une compréhension approfondie des principes électromagnétiques, du choix des matériaux magnétiques, du dimensionnement des enroulements et des contraintes thermiques et mécaniques. Un calcul précis des paramètres électriques et géométriques est indispensable afin d'obtenir un transformateur performant, présentant de faibles pertes, un bon rendement et une durée de vie satisfaisante.

Ce chapitre est consacré à la conception et à la définition d'un transformateur monophasé de basse puissance. Il aborde dans un premier temps les principes fondamentaux de fonctionnement et les différents types de transformateurs monophasés. Ensuite, les méthodes de dimensionnement du noyau magnétique et des enroulements primaire et secondaire sont présentées, en tenant compte des contraintes de puissance, de tension, de courant et de température. Enfin, ce chapitre constitue une base théorique essentielle pour la suite du travail, notamment pour le développement et la conception de la bobineuse automatique destinée à la fabrication de ces transformateurs.

1.1 Présentation d'un transformateur [9]

Un transformateur est un dispositif électrique qui permet de transformer une tension Électrique de valeur efficace et de fréquences données, en une tension électrique de même

transformateur mono phase

Fréquence, mais de valeur efficace généralement différente. Les transformateurs sont des Machines statiques et possèdent un excellent rendement. Leur utilisation est primordiale pour le transport d'énergie électrique.

1.2Utilisation d'un transformateur

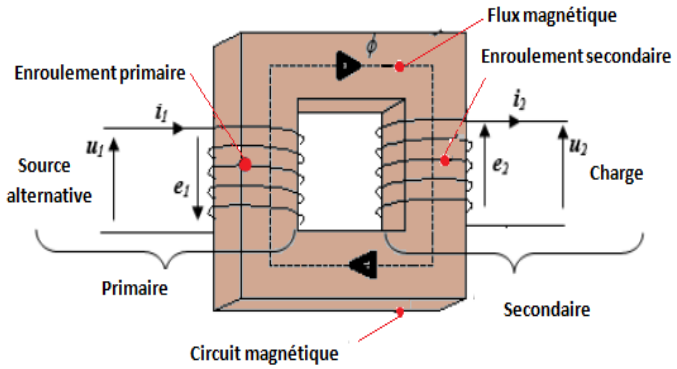
Les transformateurs sont des composants essentiels du réseau électrique. Ils sont utilisés pour le transport de l'énergie à longue distance, car les lignes hautes tensions

présentent des pertes joules. Ils servent également à baisser la tension du réseau à 220 [V], qui est la tension standard pour les appareils domestiques. Les transformateurs peuvent également être utilisés pour des applications spécifiques, telles que l'adaptation d'impédance ou le mesure de courants élevés.

1.3. Constitution d'un transformateur monophasé

Un transformateur monophasé est essentiellement constitué de :

- Un circuit magnétique
-Des enroulements primaires et secondaires.



Constitution d'un transformateur monophasé [10]

1.3.1. Le circuit magnétique :

a) Définition du circuit magnétique

Un circuit magnétique est le volume où se referment toutes les lignes de force d'un Champ magnétique c'est-à-dire une masse de matériaux dans lesquels on instaure une induction.

Comme on a à utiliser des phénomènes magnétiques, on sera amené à canaliser les lignes de force dans un circuit bon conducteur du flux magnétique. Un champ magnétique est obtenu grâce à des aimants permanents ou bien des circuits électriques parcourus par des courants.

b) Champ magnétique et induction magnétique Lorsqu'un champ magnétique H circule dans un matériau ferromagnétique, il se crée dans le matériau, une induction magnétique B, dont la variation suit la relation :

$B = \mu . H$

B : induction magnétique en [T] ;
H : champ magnétique en [A/m] ;
μ : La perméabilité magnétique de matériaux en [USI].

c) Rôle d'un circuit magnétique

Le rôle de circuit magnétique est de canalisé le flux produit par l'excitation de l'enroulement primaire vers le ou les enroulements secondaires. Le noyau se compose d'un empilement de tôles ferromagnétiques de hautes perméabilités, isolées électriquement entre elles. Le circuit magnétique doit être conçu de façon à réduire les

pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique.

d) Constitution d'un circuit magnétique :
Le circuit magnétique est constitué par des matériaux dits ferromagnétiques et en particulier du fer car ils permettent d'obtenir des flux élevés. Le champ magnétique est obtenu par le passage de courant dans les circuits électriques. Dans le fer, les lignes de champs sont concentrées dans la matière ce qui produit de grandes valeurs de flux.

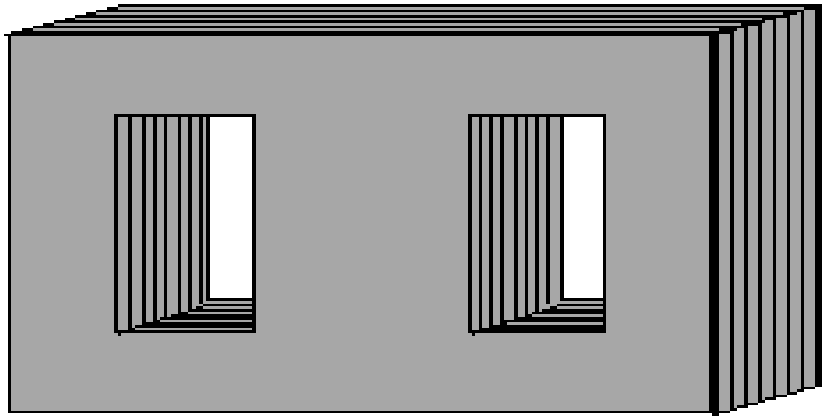


Figure 3 Carcasse d'un transformateur monophasé

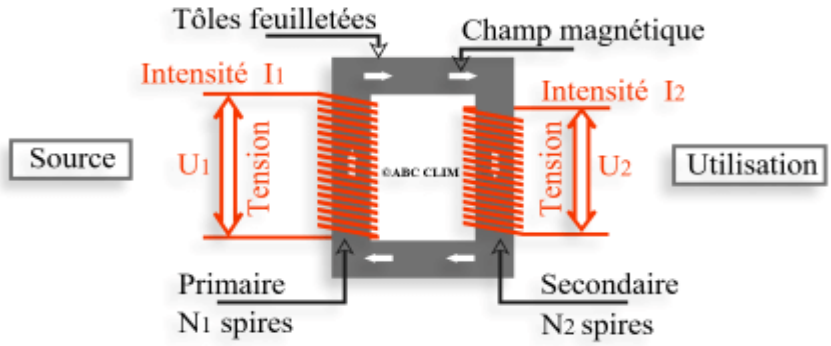
Figure 4 différentes formes des tôles magnétiques

1.3.2. Les enroulements électriques
Un transformateur monophasé est généralement constitué de deux bobinages,
Enroulement primaire et enroulement secondaire, présent sur le même circuit magnétique. Le conducteur électrique utilisé dépend des applications. Les fils électriques de chaque tour doivent être isolés les uns des autres pour que le courant circule dans chaque tour.
Comme les enroulements sont soumis à des tensions électriques, ils doivent être isolés pour assurer leur bon fonctionnement et la sécurité des utilisateurs. Une température maximale à ne pas dépasser est définie pour toute isolation.
Son fonctionnement est le suivant :
Le primaire est alimenté par un générateur de tension V1 et comporte N1 spires ; il absorbe le courant I1.

Le primaire transforme l'énergie électrocinétique qu'il reçoit en énergie magnétique. Le secondaire comporte N2 spires ; il fournit, sous la tension V2, un courant I2 au dipôle récepteur. Le secondaire transforme l'énergie magnétique qu'il reçoit en énergie électrocinétique.
Au secondaire, il peut y avoir plus d'un enroulement. Le flux magnétique est représenté par ϕ.

1.4. Rôle
Le transformateur monophasé est un convertisseur « alternatif-alternatif ». Il a pour rôle de modifier les amplitudes des grandeurs alternatives : tensions et courants, en maintenant la fréquence et la forme d'onde inchangée

1.5. Principe de fonctionnement d'un transformateur :
Le principe de fonctionnement d'un transformateur est basé sur la loi d'induction Électromagnétique. L'induction électromagnétique est le phénomène qui se produit lorsqu'un champ magnétique variable crée un courant dans un conducteur. Lorsque le courant alternatif circule dans la bobine primaire, il crée un champ magnétique alternatif. Ce champ magnétique alternatif traverse le noyau magnétique et induit un courant alternatif dans la bobine secondaire.



Les calculs :

La formule Pour déterminer le nombre de tours :

Pour déterminer le nombre de tours (ou spires) d'un transformateur, on utilise les équations qui relient la tension primaire et la tension secondaire au nombre de tours du primaire et du secondaire. Ces relations sont basées sur la loi des transformateurs.

La formule de base pour un transformateur idéal est la suivante :

N1/N2=V1/V2

où :

N1 = nombre de tours du primaire

N2 = nombre de tours du secondaire

V1 = tension à l'entrée (primaire)

V2 = tension à la sortie (secondaire)

Si vous souhaitez déterminer le nombre de tours dans le primaire ou le secondaire :

1. **Pour déterminer N1 (nombre de tours du primaire) :**

N1=N2*V1/V2

2. **Pour déterminer N2 (nombre de tours du secondaire) :**

N2=N1*V2/V1

-la relation entre le courant primaire (I1) et le courant secondaire (I2) est donnée par la formule :

I1/I2=N2/N1

I1 = courant dans le primaire

I2 = courant dans le secondaire

N1 = nombre de tours du primaire

La formule de section de câble :

Pour dimensionner la section d'un câble électrique, on utilise généralement cette formule de base :

S = (I * L * ρ) / (ΔU * V)

S : section du câble en mm²

I : intensité du courant en ampères (A)

L : longueur du câble en mètres (m) (aller-retour pour courant continu)

ρ : résistivité du matériau du câble (par exemple, cuivre ou aluminium) en Ω·mm²/m

ΔU : chute de tension admissible en volts (V)

V : tension du réseau en volts (V)

Remarque :

Résistivité du matériau : pour le cuivre, ρ ≈ 0,0175 Ω·mm²/m, et pour l'aluminium, ρ ≈ 0,028 Ω·mm²/m.

V1=4,44*f*N1* Φ max

N1=V1/(4 ,44.f.Φmax)

Φmax=B max*S

N1=V1/(4.44.f.Bmax.S)

Où :

V1 : tension efficace (ou RMS) appliquée sur le primaire,

f : fréquence du courant alternatif (en hertz),

N1 : nombre de tours du primaire,

Φmax: flux magnétique maximum dans le noyau du transformateur.

S : surface de circuit magnétique

Pour application numérique on considère le dimensionnement d'un

Transformateur : [11]

U1=220v U2=24v f=50hz I2=5A

S1=S2=U2*I2=24*5=120 VA

S2=120VA

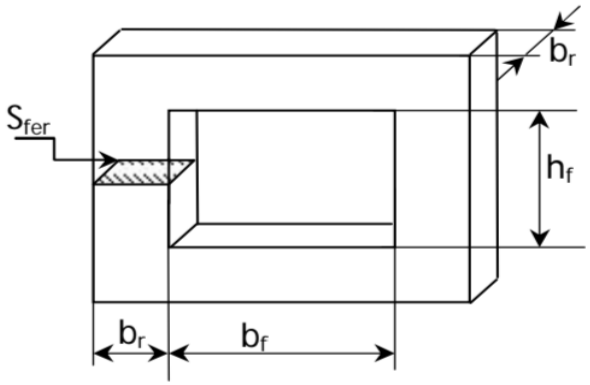
*Refroidissement naturel.

Pour les données de dimensionnement, on prend :

$$\beta = 1.5T$$

Effectuer le dimensionnement du transformateur consiste à trouver les Valeurs aux dimensions géométriques du circuit magnétique : S fer, b r, b f h f

Ainsi que le calcul des nombres de spires (n1 n2) et les sections des Conducteurs (Sc1 Sc2) relatifs aux bobines primaire et secondaire.



Représentation du noyau magnétique et de sa section

a) Calcul de la section du noyau S Fer

Dans l'hypothèse d'un transformateur parfait on peut écrire :

U1=4.44*n1*f*β*S fer

Où

$$\frac{n1}{u1} = \frac{1}{4.44 * f * Sfer * \beta}$$

Pour

f=50hz β=1.5on a

$$\frac{N1}{U1} = \frac{1}{4.44*50*S\,fer*1.5} = \frac{3*10^{-3}}{Sfer}$$

Soit $S'fer$ la section du fer exprimée en [cm^2], on peut donc écrire :

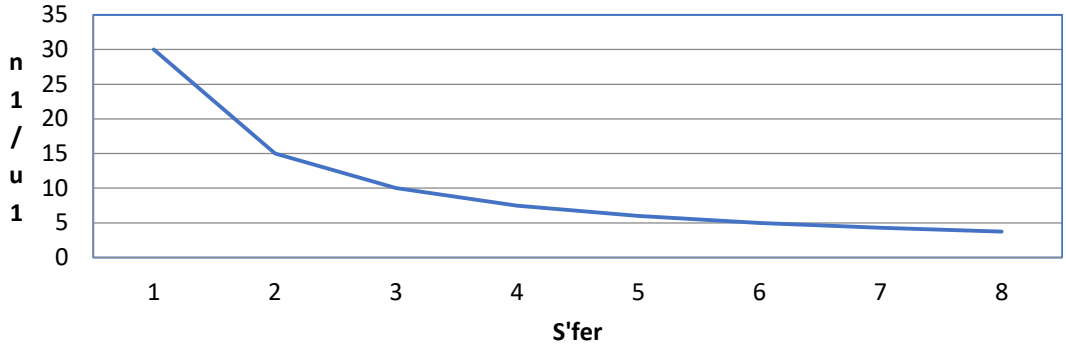
$$\frac{n1}{u1} = \frac{30}{S'fer}$$

Remarque :

1) Représente le nombre de spires/volt. Plus ce chiffre est grand plus il faut un nombre de spires élevé.

2) Si on choisit S fer élevé (on met beaucoup de fer) on réduit le nombre de spires n1 (on économise le cuivre). Par contre si on choisit S fer faible on doit mettre plus de spires (économie du fer au détriment du cuivre). $\frac{n1}{u1}$

3) Généralement on choisit S fer et $\frac{n1}{u1}$ en même temps en choisissant un compromis entre ses deux paramètres.



Evolution du rapport n1/u1 en fonction de s'fer

Si on veut n1≥1000 spires on opte pour $\frac{n1}{u1}$=4.28

N1=941.6=942spires

Et **S'fer =7cm^2**

De même on peut calculer

$$\frac{N2}{N1} = \frac{U2}{U1}$$

N2=$\frac{N1*U2}{U1} = \frac{942*24}{220} = 102.76$

N2=103spires

Le rapport de transformation :

m=$\frac{N2}{N1} = \frac{u2}{u1}$

m=$\frac{103}{942}$=0.1

b) Calcul des sections des conducteurs (bobines primaire et secondaire Sc1 et Sc2) :

m=$\frac{I1}{I2}$ I1=m*I2=0.1*5

I=0.5A

c)La densité de courant J [A/ m2] dans un conducteur est définie par :

J=$\frac{I}{Sc1}$ d ou Sc =$\frac{I}{J}$ on en déduit :

Sc1m^2=$\frac{I1}{J1} = \frac{0.5}{2.5*10^6}$

Sc1mm^2 =$\frac{0.5}{2.5} = 0.2$ mm^2

Sc2mm^2=$\frac{I2}{J2} = \frac{5}{2.5} = 2$mm^2

d)Calcul des diamètres des conducteurs d1 et d2:

Sc =πr^2 ou r=$\sqrt{\frac{Sc}{\pi}}$ ou d=2$\sqrt{\frac{Sc}{\pi}}$

d1=2$\sqrt{\frac{Sc}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{0.2}{\pi}}$ =0.504mm

d2=2$\sqrt{\frac{Sc2}{\pi}}$=2$\sqrt{\frac{2}{\pi}}$ =1.596mm

e) Calculer la surface totale de cuivre :

Scu=Sc1+Sc2=n1*Sc1+n2*Sc2

Scu=942*0.2+103*2=394.4mm^2

Scu :394 ,4mm^2

Conclusion :

Les transformateurs sont des dispositifs électriques essentiels pour le système de distribution de l'électricité, et pour l'usage de plusieurs appareils domestiques.

Un transformateur idéal présente des caractéristiques impeccables et un rendement parfait. Cependant, tous les transformateurs ne sont pas idéaux. Le noyau magnétique et surtout les enroulements non corrects peuvent causer des pertes significatives du rendement pour le transformateur. Un enroulement automatisé peut être proposé comme une solution pour remédier à ce problème. C'est pourquoi, l'étude sur la technologie des bobineuses sera présentée dans la partie suivante.

Chapitre 3

Conception mécanique et électrique de la bobineuse automatique

Introduction

La conception mécanique d'une bobineuse automatique de transformateur monophasé vise à assurer un enroulement uniforme du fil conducteur autour du support de la bobine. Elle repose sur une structure mécanique rigide, des systèmes de transmission fiables et des mécanismes de guidage précis permettant de maintenir une tension constante du fil et un positionnement correct des spires. Une conception mécanique adéquate contribue à la stabilité de la machine, à la réduction des vibrations et à l'amélioration de la qualité finale des enroulements.

Parallèlement, la conception électrique joue un rôle déterminant dans l'automatisation et le contrôle du processus d'enroulement. Elle comprend le choix des moteurs électriques, notamment les moteurs pas à pas, des dispositifs de puissance, des capteurs .

Ainsi, l'intégration cohérente de la conception mécanique et électrique dans une bobineuse automatique de transformateur monophasé permet d'obtenir des bobines de haute qualité répondant aux exigences techniques et industrielles actuelles. Cette approche contribue à l'amélioration des performances électriques du transformateur tout en renforçant la fiabilité et l'efficacité du processus de fabrication.

Partie mécanique :

La conception 3D sur SolidWorks :

-Modélisation de la bobineuse :
Avant de pouvoir construire un projet, il est nécessaire de le modéliser.

La modélisation est un processus qui consiste à créer une représentation abstraite de projet à l'aide d'un logiciel.
Cette représentation peut être utilisée pour comprendre le projet, identifier les risques et les opportunités, et prendre les décisions éclairées.
De ce fait, le logiciel de modélisation que nous allons utiliser pour la modélisation d'une bobineuse de transformateurs est le logiciel SOLIDWORKS.

1**. Présentation de SOLIDWORKS**
Le logiciel SOLIDWORKS est une application d'automatisation de la conception mécanique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des caractéristiques et des dimensions, et de reproduire des modèles et des dessins détaillés. [12]

2**. Design de la machine**
Le design de la machine se penchera surtout sur les parties principaux d'une bobineuse. Une bobineuse est composée :

-Le moteur pas a pas

-La Arduino

-Driver moteur

-Le guidage linéaire

-Alimentation

-Bloc convertisseur

_Vise san fin avec écrou en laiton

-Coupleur

Présentation en SolidWorks :

1-moteur pas à pas :

-NEMA23 moteurs pas à pas avec connecteurs et câble 1m 57HS76-3004A08-D21

Dans une bobineuse automatique, le moteur pas à pas est un composant crucial qui permet un positionnement extrêmement précis du fil sur la bobine Son principe d'utilisation est basé sur la conversion d'impulsions électriques en mouvements angulaires discrets (les "pas").

Voici comment il s'applique spécifiquement dans ce contexte :

Contrôle précis de la position et du mouvement

Le rôle principal du moteur pas à pas est de contrôler le déplacement linéaire (guidage du fil) et/ou la rotation de la bobine avec une grande exactitude.

Contrôle du guidage du fil : Le moteur déplace la tête de guidage du fil d'un pas (ou micro-pas) pour chaque couche d'enroulement, assurant que le fil soit posé précisément côte à côte, sans chevauchement excessif ni espace.

Contrôle de la rotation de la bobine : Il peut aussi être utilisé pour faire tourner la bobine elle-même, en synchronisation parfaite avec le mécanisme de guidage.

Les Avantages :

- **Précision et répétabilité :** Les moteurs pas à pas garantissent que chaque bobine produite est identique à la précédente, respectant les spécifications techniques (nombre de tours, tension du fil, etc.).
- **Couple de maintien élevé :** Un moteur pas à pas maintient sa position lorsqu'il est sous tension (couple de maintien), ce qui est essentiel pour maintenir le fil sous tension et éviter qu'il ne se déroule pendant ou après l'opération.
- **Contrôle de vitesse et d'accélération :** La vitesse de bobinage peut être contrôlée avec précision en ajustant la fréquence des impulsions.

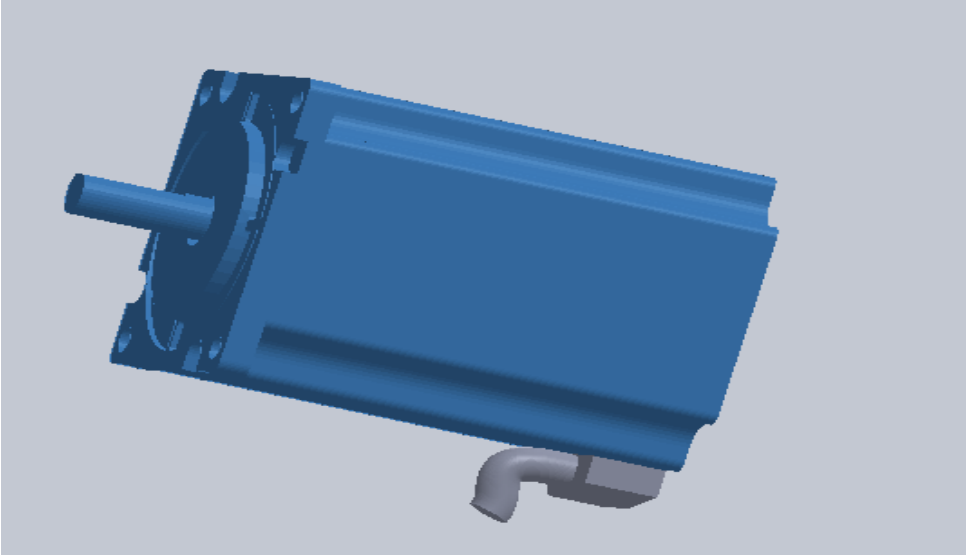


Figure 5 NEMA23 moteurs pas-a- pas avec connecteurs et câble 1m 57HS76-3004A08-D21

2- Arduino uno :

Dans une bobineuse automatique, l'Arduino Uno agit comme le microcontrôleur central (le "cerveau") qui gère et coordonne tous les aspects du processus d'enroulement. Son principe d'utilisation consiste à exécuter un programme spécifique pour contrôler avec précision les différents composants mécaniques et électroniques de la machine

Contrôle des Moteurs

L'Arduino Uno est essentiel pour piloter les moteurs qui effectuent les mouvements critiques :

- **Moteur de la broche principale :** L'Arduino contrôle la vitesse et le sens de rotation du moteur qui fait tourner le support de la bobine.
- **Moteur de guidage du fil :** Un moteur pas à pas (stepper motor) est généralement utilisé pour déplacer le chariot qui distribue le fil d'un côté à l'autre de la bobine. L'Arduino envoie des impulsions précises à son driver pour contrôler la position exacte du fil, assurant un enroulement uniforme couche par couche.

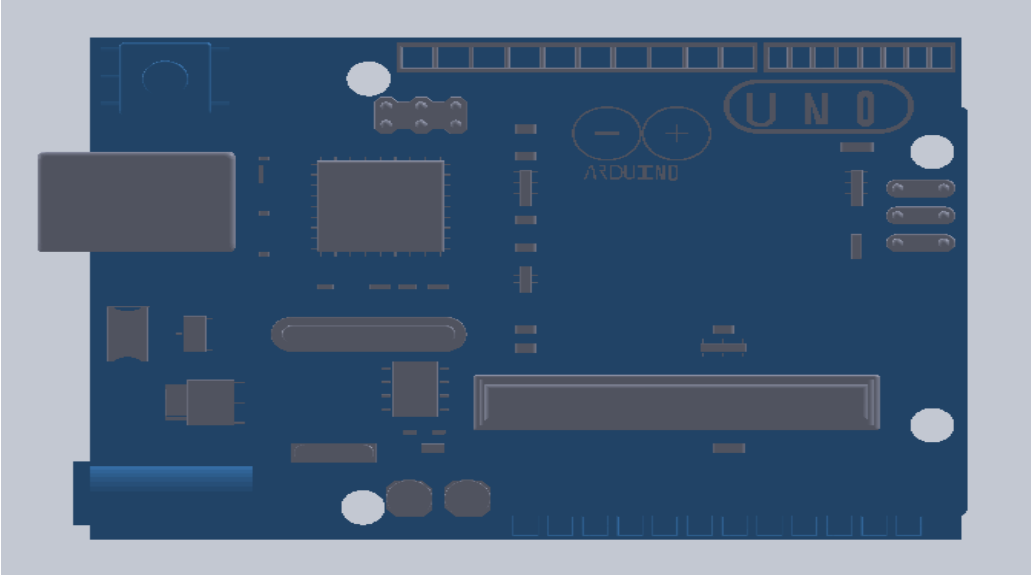


Figure 6 Arduino uno Rev3-DIP

3- driver moteur : driver moteur PAS A PAS –M545D

le driver M545D trouve une application pertinente dans les bobineuses automatiques, où la précision et le contrôle du mouvement sont essentiels.

Rôle et applications dans une bobineuse automatique :

Dans une bobineuse automatique, le driver M545D est généralement utilisé pour contrôler le ou les moteurs responsables des mouvements suivants :

1. **Rotation de la bobine (axe principal) :** Le driver contrôle le moteur qui fait tourner la bobine sur laquelle le fil est enroulé. La précision du moteur pas à pas, gérée par le M545D, garantit un nombre de tours exact et une vitesse de rotation précise.
2. **Guidage du fil (axe transversal) :** Le driver peut également piloter le moteur qui déplace le guide-fil d'avant en arrière le long de la bobine. Le contrôle précis des micro-pas du M545D permet de positionner le fil exactement là où il doit être enroulé, assurant ainsi un bobinage uniforme et sans chevauchement.
3. Son principe d'utilisation consiste à exécuter un programme spécifique pour contrôler avec précision les différents composants mécaniques et électroniques de la machine

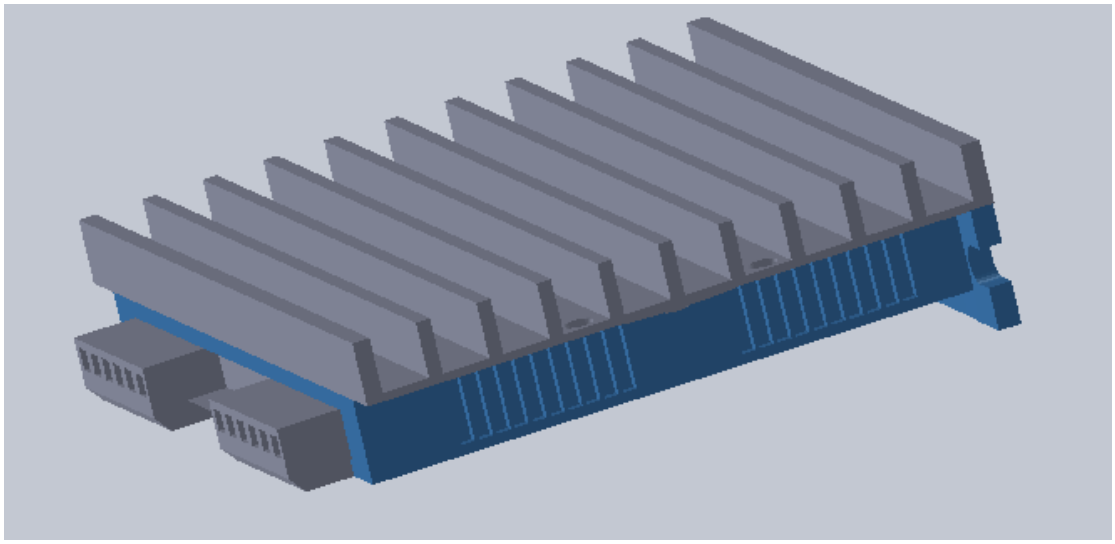


Figure 7 driver moteur PAS A PAS –M545D

4- alimentation :

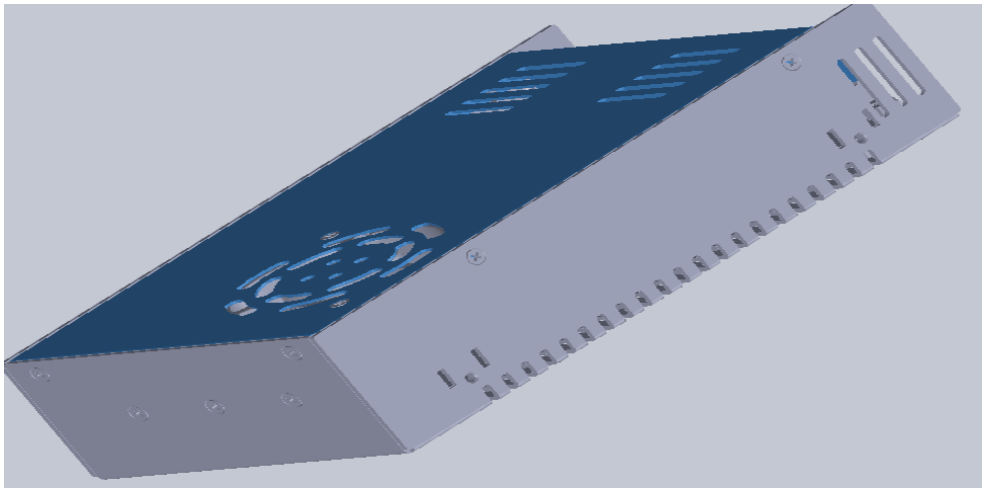


Figure 8 alimentation 24 v 10A 240 w

5-**le guidage linéaire** :

Dans une bobineuse automatique, le guidage linéaire est un composant crucial qui assure le positionnement précis du fil sur la bobine, garantissant ainsi un bobinage homogène et de haute qualité.

Le rôle principal du guidage linéaire se situe dans l'unité de traverse. Il permet à l'ensemble qui dépose le fil (souvent appelé "guide-fil" ou "tête de bobinage") de se déplacer avec une grande précision d'avant en arrière le long de l'axe de rotation de la bobine. La précision de ce mouvement est essentielle pour distribuer uniformément le fil et éviter les chevauchements ou les espaces.

En résumé, le guidage linéaire est la clé de la précision et de la répétabilité du processus de bobinage automatique, assurant que le produit final réponde aux spécifications techniques requises.

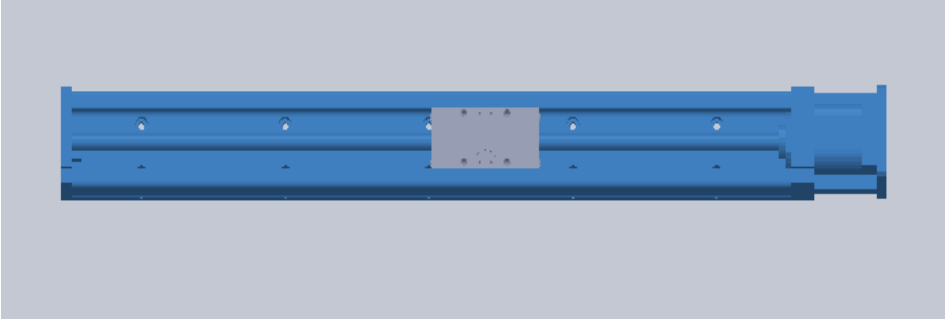


Figure 9 guidage linéaire

6- **Bloc convertisseur :**

Dans une bobineuse automatique, le bloc convertisseur carré est un composant mécanique essentiel utilisé pour assurer le guidage précis du fil pendant le processus de bobinage.

Son application principale est de convertir le mouvement de rotation d'un moteur en un mouvement linéaire contrôlé le long d'un axe

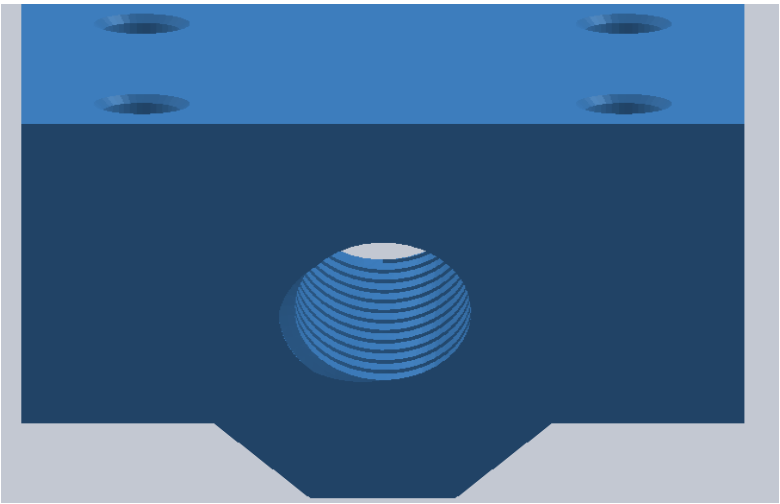


Figure 10 bloc convertisseur carre pour T8 écrou

7- Vise san fin avec écrou en laiton :

Dans une machine à bobiner automatique, la vis sans fin est un composant essentiel du mécanisme, principalement utilisée pour ses propriétés de réduction de vitesse, d'augmentation de couple et d'auto-blocage.

- Contrôle précis du mouvement du fil

Le processus de bobinage nécessite un placement extrêmement précis du fil sur la bobine pour assurer une densité et une tension uniformes

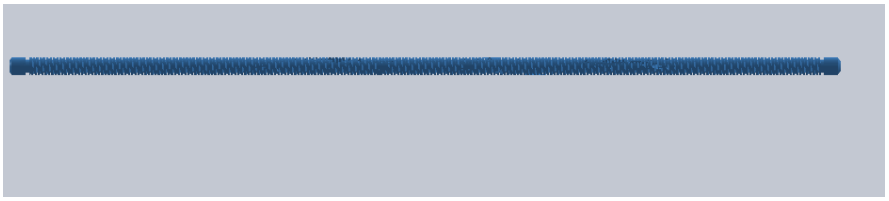


Figure 11 vise san fin

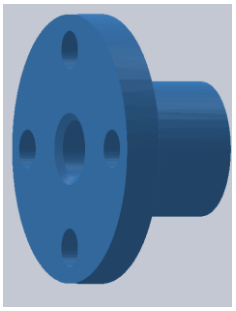


Figure 12 écrou en laiton

8- Coupleur :

Dans une bobineuse automatique, le coupleur d'arbre flexible en aluminium 8x8x25mm est un composant essentiel qui assure la liaison mécanique entre un moteur (généralement un moteur pas à pas ou un servomoteur) et un autre élément rotatif, tel que l'arbre d'enroulement ou une vis-mère (vis trapézoïdale).

Ses applications et fonctions spécifiques dans ce contexte sont les suivantes :

Applications principales

Entraînement de la bobine : Le coupleur transmet le mouvement de rotation du moteur à l'arbre sur lequel le fil est enroulé. Cela permet un contrôle précis de la vitesse et de la position angulaire pour un bobinage uniforme.

Contrôle du guidage du fil : Dans les bobineuses automatiques, un mécanisme de guidage (souvent piloté par une vis-mère) déplace le fil d'avant en arrière le long de l'arbre d'enroulement. Le coupleur peut être utilisé pour relier le moteur pas à pas qui entraîne cette vis-mère .

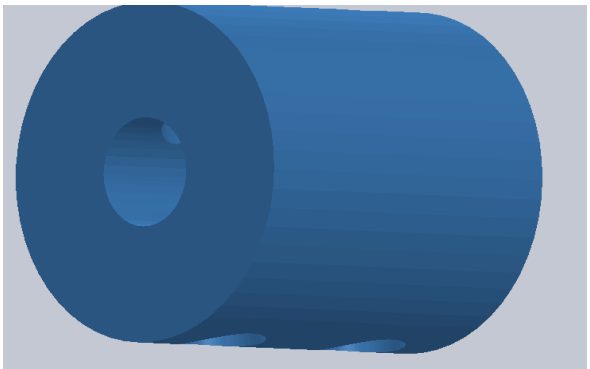


*Figure 13 coupleur d'arbre flexible en aluminium 8*8*25mm*

La machine complète :

En assemblant toutes les modélisations des différentes parties mécaniques de la Machine.

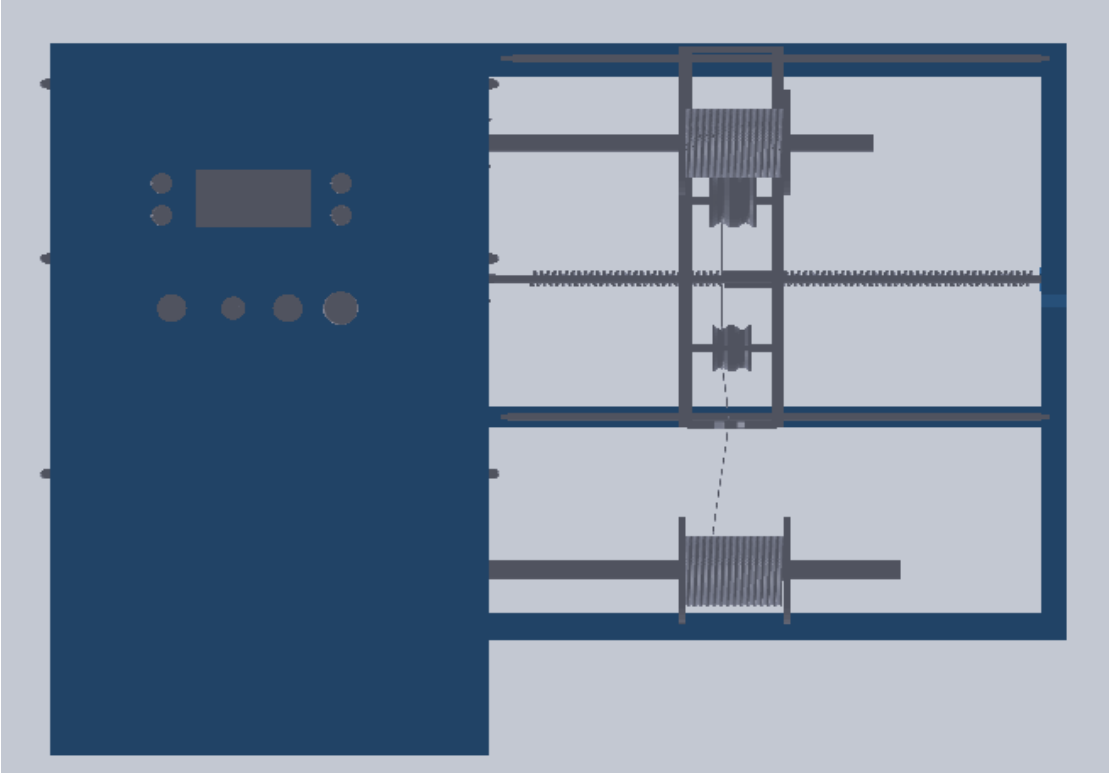


Figure 14 bobineuse auto

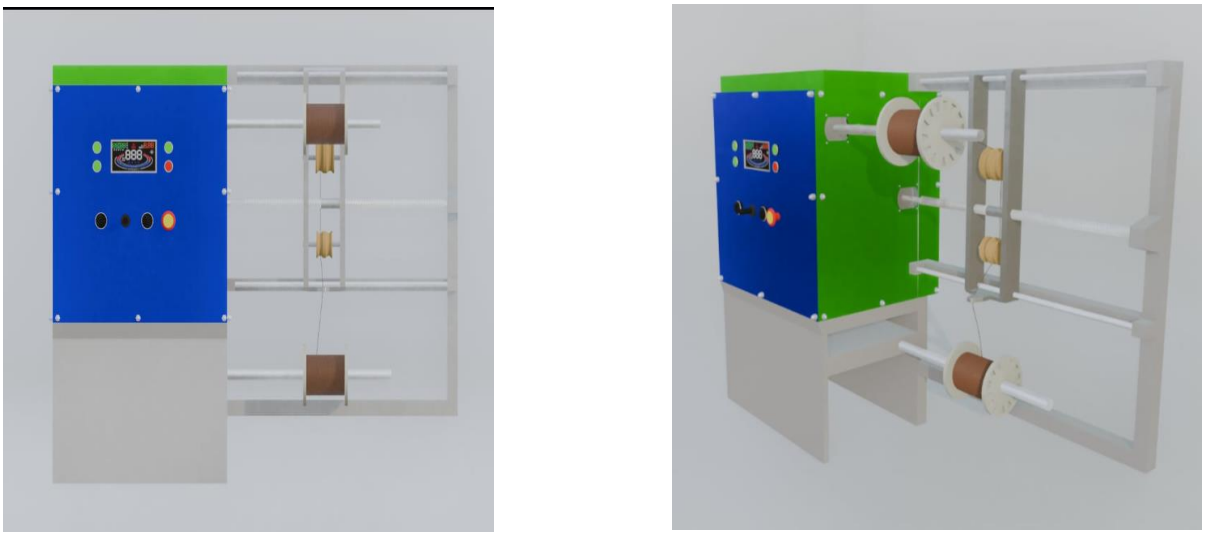


Figure 15 MACHINE COMPLET

Partie électrique :

1-Schéma électrique :

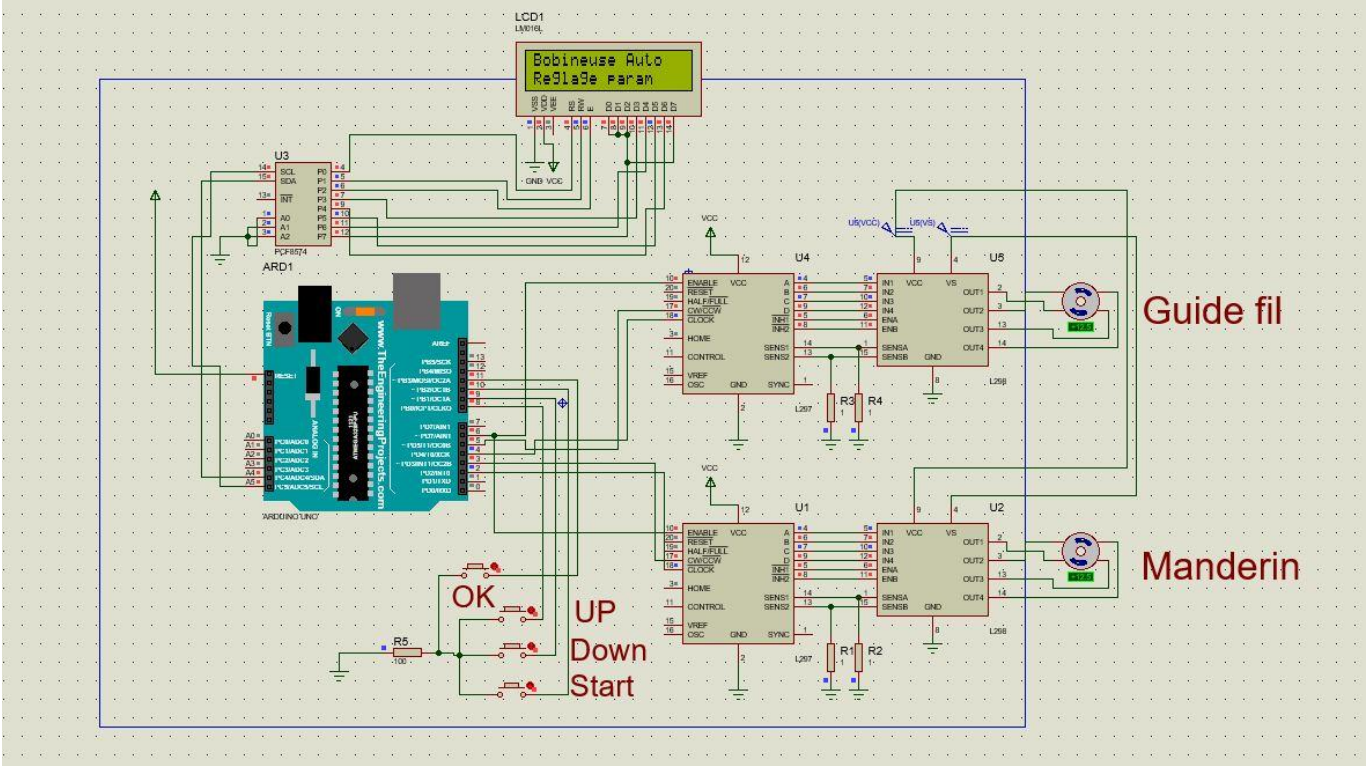


Figure 16 : schémas électriques [13]

Programme Arduino :

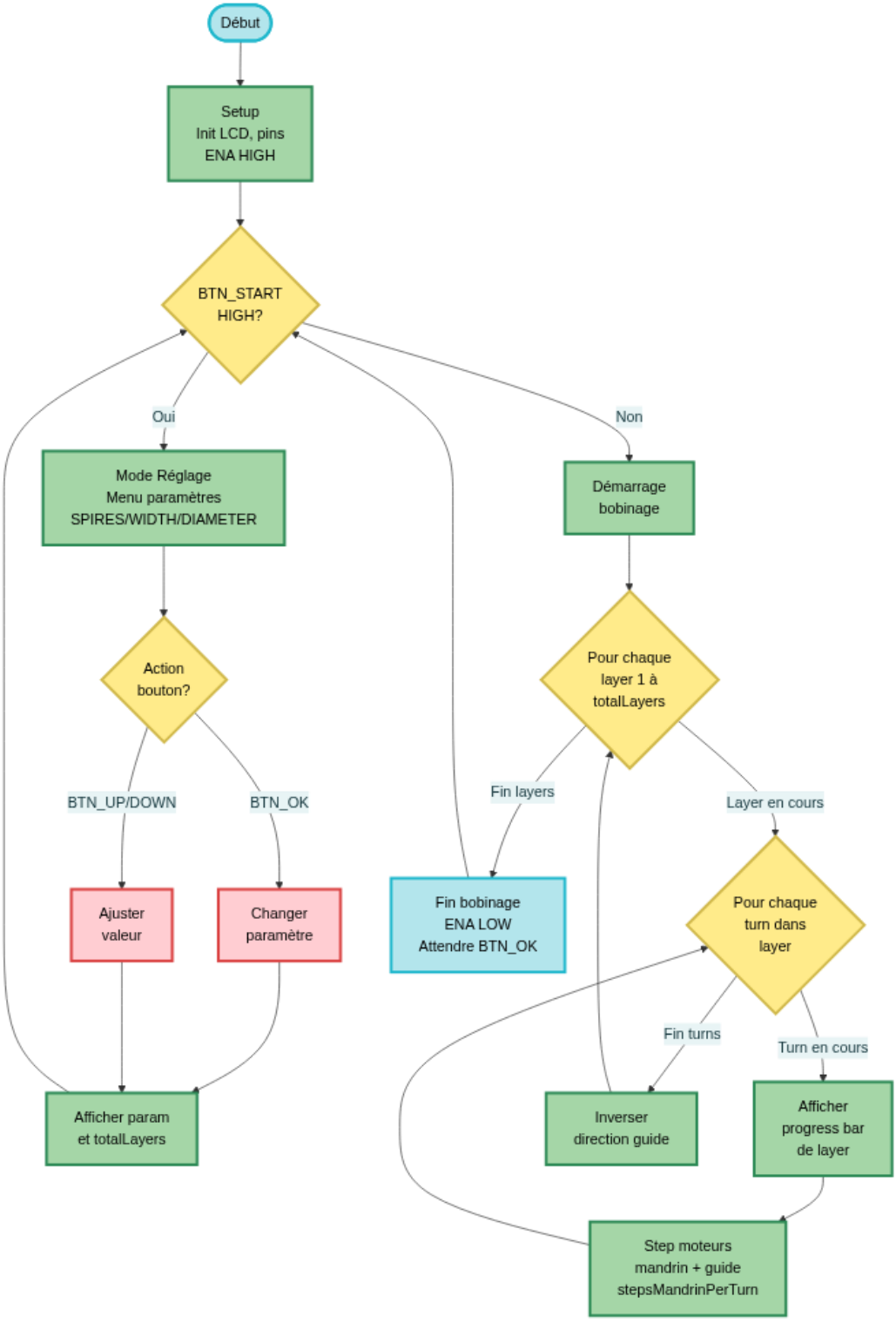


Figure : Organigramme de la commande par arduino

Ce programme Arduino implémente une bobineuse automatique complète pour enrouler du fil de manière uniforme sur une bobine, en synchronisant deux moteurs pas à pas (mandrin rotatif et guide-fil transversal) via un menu LCD interactif et des boutons. Il calcule dynamiquement les couches nécessaires et affiche une barre de progression en temps réel, avec inversion de direction du guide pour des couches alternées parfaites.

Initialisation (setup)

Les pins moteurs (STEP/DIR/ENA) et boutons (INPUT_PULLUP) s'initialisent, le driver s'active (ENA HIGH), et les directions se fixent à HIGH. Le LCD I2C (adresse 0x20) affiche un message de bienvenue. Steps Mandrin Per Turn fixe 5 microsteps par tour (pour précision). Paramètres par défaut : 200 spires, bobine 20mm, fil 0.5mm, délai step 6000µs (vitesse

Les pins moteurs (STEP/DIR/ENA) et boutons (INPUT_PULLUP) s'initialisent, le driver s'active (ENA HIGH), et les directions se fixent à HIGH. Le LCD I2C (adresse 0x20) affiche un message de bienvenue. Steps Mandrin Per Turn fixe 5 microsteps par tour (pour précision). Paramètres par défaut : 200 spires, bobine 20mm, fil 0.5mm, délai step 6000µs (vitesse ~1667 pas/s).

Mode réglage (while BTN_START HIGH)

Un enum Param cycle entre SPIRES/WIDTH/DIAMETER via BTN_OK (anti-rebond 300ms). BTN_UP incrémente (+10 spires, +0.5mm largeur, +0.05mm diamètre), BTN_DOWN décrémente avec limites de sécurité. turnsPerLayer = bobbinWidth / wireDiameter ; totalLayers = ceil(totalTurns / turnsPerLayer). LCD montre paramètre actif (">Spires: 200") et couches calculées, rafraîchi 150ms pour fluidité.

Phase bobinage (BTN_START pressé)

LCD "Bobinage ON", ENA HIGH. Pour chaque couche (1 à totalLayers) : turnsThisLayer = min(turnsPerLayer, reste spires). Pour chaque tour : currentTurn++, barre LCD (16 blocs proportionnels à currentSpireInLayer/turnsPerLayer via byte(255)). Boucle stepsMandrinPerTurn : STEP_MANDRIN et STEP_GUIDE HIGH/LOW simultanément (delayMicroseconds(stepDelay) x2 par pas pour symétrie). Post-couche : direction guide inverse (DIR_GUIDE toggle).

Fin et boucle

"Bobinage fini", ENA LOW (désactive moteurs), attente BTN_OK. Retour automatique au mode réglage (lcd.clear() en fin loop). Cycle infini sans reset requis, idéal pour production continue.

Logique avancée

- **Synchronisation parfaite** : Pas identiques mandrin/guide assurent alignement fil.
- **Gestion couches** : min() évite dépassement spires, ceil() optimise remplissage.
- **Interface utilisateur** : Anti-rebond, limites, progression visuelle intuitive.
- **Robustesse** : Pas d'interruption pendant bobinage, mais extensible (urgence via BTN_START).

2 La définition des composants électrique [14]

2-1les moteurs et les drivers des moteurs

2-1-1 NEMA23 moteurs pas-a- pas avec connecteurs et câble 1m 57HS76-3004A08-D21:

Le **NEMA 23** fait référence à la taille du boîtier du moteur dans le standard de l'Association Nationale des Fabricants d'Equipement Electrique (NEMA), qui est largement utilisé pour les moteurs pas-à-pas. Plus précisément, **NEMA 23** désigne un moteur dont la flasque a un côté de 2,3 pouces (environ 57,15 mm). C'est une taille courante pour les moteurs utilisés dans des applications nécessitant une puissance et un couple modérés, comme l'automatisation, la robotique et les imprimantes 3D. Un **moteur pas-à-pas** (ou moteur pas-à-pas NEMA 23 dans ce cas) est un type de moteur électrique qui se déplace en "pas" distincts, chaque impulsion contrôlant un petit mouvement du moteur. Cela permet un contrôle très précis du mouvement, ce qui est essentiel pour des applications comme les imprimantes 3D ou les machines de découpe.

Quant au **57HS76-3004A08-D21**, il s'agit d'un modèle spécifique de moteur pas-à-pas NEMA 23. Le nom du modèle contient généralement des informations sur les caractéristiques du moteur, comme :

57 : Taille du moteur (NEMA 23)

HS76 : Code spécifique à ce modèle particulier

3004 : Peut-être le nombre de phases ou le type de bobinage

A08-D21 : Références spécifiques liées à la configuration de l'arbre du moteur et à la connectique.

Le **connecteur et câble de 1m** sont des accessoires qui permettent de connecter le moteur à un contrôleur ou à un driver. Le câble de 1m est souvent inclus pour faciliter l'installation et les connexions.

Figure 17 NEMA23 moteurs pas-a- pas

2-1-2 driver moteur PAS A PAS –M545D :

Le moteur pas à pas M545D est un moteur à courant continu avec des étapes bien définies. Il est souvent utilisé dans des applications nécessitant un mouvement précis et contrôlé, comme les imprimantes 3D, les robots, et autres systèmes automatisés.

Le *driver* pour un moteur pas à pas M545D est un dispositif électronique qui contrôle l'alimentation du moteur pour lui permettre de tourner avec une grande précision. Ce driver est responsable de la gestion du courant envoyé au moteur et de la synchronisation des étapes pour que le moteur avance de manière fluide.

Voici quelques caractéristiques du moteur pas à pas M545D et de son driver :

Moteur Pas à Pas M545D :

. Pilote pas à pas 2 phases, adoption de la technologie de hachoir bipolaire à courant constant

. Faible bruit, faibles vibrations et faible élévation de température

. Tension 24-50 V CC

. Avec 8 réglages de courant de sortie, plage de courant 1,5-4,5 A.

. Avec 14 stalles réglage de subdivision micro steppe.

. Demi-courant automatique, fils du moteur mal connectés, surtension, sous-tension, protection contre les surintensités

. Isolation optique interne, réponse en fréquence la plus élevée 200 KHZ

. Convient au courant de moteur pas à pas Nema 23, Nema 34 inférieur à 4,5 A.

Driver M545D :

Un driver pour moteur pas à pas permet de :

Contrôler la vitesse de rotation : En ajustant la fréquence des impulsions envoyées au moteur.

Gérer le couple du moteur : Selon la tension et le courant fournis.

Gérer le mode de pas : Par exemple, en mode pleine étape (full steppe), demi-étape (half steppe) ou micro-pas (micro sleeping) pour des mouvements plus fluides.

Le choix du driver dépend de la capacité de gestion du courant et de la tension de votre moteur, ainsi que de la précision de mouvement nécessaire pour votre application.

Driver typique pour M545D :

Exemples de drivers populaires : A4988, DRV8825 ou TB6600. Ces drivers sont capables de gérer les moteurs pas à pas et offrent diverses fonctionnalités comme la gestion du micro-pas, la protection contre les surintensités, et des possibilités de contrôle de la vitesse.

Schéma de câblage :

Il est important de bien connecter les fils du moteur pas à pas au driver et d'alimenter correctement le driver avec la tension adaptée. Un diagramme de câblage typique pour un moteur pas à pas M545D avec un driver comme le A4988 ressemble à ceci :

Moteur : 4 fils pour un moteur bipolaire ou 6-8 fils pour un moteur unipolaire.

Driver : Connexion de l'alimentation, du contrôleur de pas, des lignes de direction et de la masse..

Figure 18 driver moteur PAS A PAS –M545D

2-1-3 alimentation 24 v 10A 240 w :

L'alimentation **24 V 10 A 240 W** est un dispositif qui fournit une tension de 24 volts avec un courant de 10 ampères, ce qui permet d'atteindre une puissance de 240 watts. Voici une explication détaillée des éléments :

24v : Il s'agit de la tension de sortie de l'alimentation. Cela signifie que l'appareil ou le système connecté à cette alimentation recevra une tension de 24 volts.

10 A : Cela indique le courant maximum que l'alimentation peut fournir. Dans ce cas, l'alimentation peut fournir un courant de 10 ampères sans être endommagée.

240 W: La puissance maximale de l'alimentation. La puissance est le produit de la tension et du courant (P = V × I). Dans ce cas, 24 V × 10 A = 240 W, ce qui signifie que l'alimentation peut délivrer un maximum de 240 watts de puissance.

Cela peut être utilisé pour alimenter des appareils électroniques ou des systèmes nécessitant une tension de 24 V et une consommation de courant jusqu'à 10 A, avec une consommation maximale de 240 W.

Figure 19 alimentation 24 v 10A 240 w

2-1-4Arduino uno Rev3-DIP :

L'**Arduino Uno Rev3 DIP** est une carte de développement basée sur le microcontrôleur **ATmega328P**. C'est une version populaire de la carte Arduino, largement utilisée dans les projets de prototypage électronique et d'apprentissage de la programmation.

Caractéristiques :

Microcontrôleur : ATmega328P

Tension d'alimentation : 5 V (peut aussi être alimentée par une source externe de 7 à 12 V)

Entrées/Sorties (I/O) : 14 broches numériques, dont 6 peuvent être utilisées comme sorties analogiques PWM

Mémoire : 32 Ko de mémoire flash (dont 0,5 Ko est utilisé par le boot loader), 2 Ko de SRAM, et 1 Ko de mémoire EEPROM

Communication : Interface USB pour la programmation, ainsi que des pins pour la communication série (UART), I2C, et SPI

Connectivité : Port USB pour la programmation et la communication avec un ordinateur

Détails clés de l'Arduino Uno Rev3 DIP :

Arduino Uno : "Uno" signifie "un" en italien, et cela fait référence au fait que c'est la première carte de la série Arduino à avoir un processeur ATmega328P. C'est une carte de base utilisée dans de nombreux projets électroniques et informatiques.

Rev3 (Révision 3) : Cela indique qu'il s'agit de la troisième révision de la carte Arduino Uno, qui a apporté des améliorations par rapport aux versions précédentes, telles que des modifications dans le connecteur USB et la gestion des broches.

DIP (Dual On-line Package) : Ce terme fait référence à la forme du **microcontrôleur ATmega328P** qui est monté sur la carte sous forme de boîtier à broches (DIP). Ce type de montage permet de retirer et remplacer le microcontrôleur si nécessaire, contrairement aux versions SMD (Surface-Mount Devise) qui sont soudées directement sur la carte.

Utilisation :

Figure 20 Arduino uno Rev3-DIP

L’Arduino Uno Rev3 DIP est utilisé dans des projets variés, allant de la création de prototypes pour des objets connectés, de l'automatisation, de la robotique, à l'apprentissage de la programmation et de l'électronique. Grâce à son environnement de développement intégré (IDE) facile à utiliser, il est particulièrement adapté aux débutants.

PARTIE MECANIQUE

1-1guidage ***linéaire :***

Un guide linéaire est un élément de machine qui utilise des roulements, qui ont été développés pour le mouvement rotatif, afin de déplacer facilement des objets lourds en ligne droite.

Il est appelé « roulement à billes linéaire à recirculation » par l Ios et le J'ai et « guidage linéaire » par l'association japonaise des constructeurs de machine outils.

Types de guidage linéaire :

Rails à billes : Composé de rails et de chariots avec des billes qui circulent entre eux, offrant un mouvement très fluide.

Guides à rouleaux : Similaire aux rails à billes, mais utilisant des rouleaux pour supporter la charge, adaptés aux applications de charges lourdes.

Guides à coussin d'air : Utilisent un film d'air pour maintenir un objet en lévitation et réduire les frottements, souvent utilisés dans des applications très sensibles.

Caractéristiques du guidage linéaire :

1. **Précision du mouvement** : Le guidage linéaire permet des déplacements très précis dans une direction donnée, avec un minimum de jeu ou de déviation.
2. **Réduction des frottements** : Il utilise des éléments comme des roulements à billes ou des rails pour réduire la friction entre les surfaces en mouvement. Cela permet un mouvement fluide et sans à-coups, et augmente la durée de vie des composants.
3. **Capacité de charge** : Selon la conception et les matériaux utilisés, un système de guidage linéaire peut supporter des charges lourdes tout en maintenant la précision du mouvement.
4. **Applications courantes** :

   Machines-outils : Pour les mouvements des pièces de machines avec une grande précision.

   Robotique : Dans les bras robotiques, pour des mouvements linéaires précis.

   Impression 3D : Pour déplacer les têtes d'impression de manière contrôlée.

   Systèmes d'automatisation : Pour les rails de transport, les systèmes de convoyage.

En résumé, un **système de guidage linéaire** est essentiel pour permettre un déplacement fluide, précis et stable dans des applications où la précision et la réduction des frottements sont cruciales.

Figure 21 guidage linéaire

1-2- bloc convertisseur carre pour T8 écrou :

Caractéristiques

Matériel : Aluminium

Poids : env.74g

Taille ; env. 34*30*30mm/1.33*1.18*1.18

Application : pour imprimante 3D

Figure 22 bloc convertisseur carre pour T8 écrou

1-3-vise trapézoïdale T8*500mm avec écrou en laiton :

Description :

Matériau : vis mère en acier inoxydable 304 / écrou en laiton

Diamètre de la vis : 8 mm

Pas : 2 mm

Pas du filetage : 8 mm

Longueur : 500 mm

Gamme : accessoires pour imprimante 3D Reprap Maker bot

*Figure 23 vise trapézoïdale T8*500mm avec écrou en laiton*

1-4- coupleur d'arbre flexible en aluminium 8*8*25mm

Caractéristiques :

-Version en aluminium léger de l'accouplement d'arbre standard de l'industrie
-Interchangeable avec les gammes de moyeux L et SS
-Résistant à la corrosion (alésages finis passivés pour une protection supplémentaire)
-S'adapte au désalignement angulaire et parallèle de l'arbre
-Sécurité intégrée - fonctionnera toujours si l'"araignée" en élastomère tombe en panne
-Pas de contact métal sur métal
-Résistant à l'huile, à la saleté, au sable, à l'humidité et à la graisse

*Figure 24 coupleur d'arbre flexible en aluminium 8*8*25mm*

2-Montage de moteur pas a pas avec l'arduino uno :

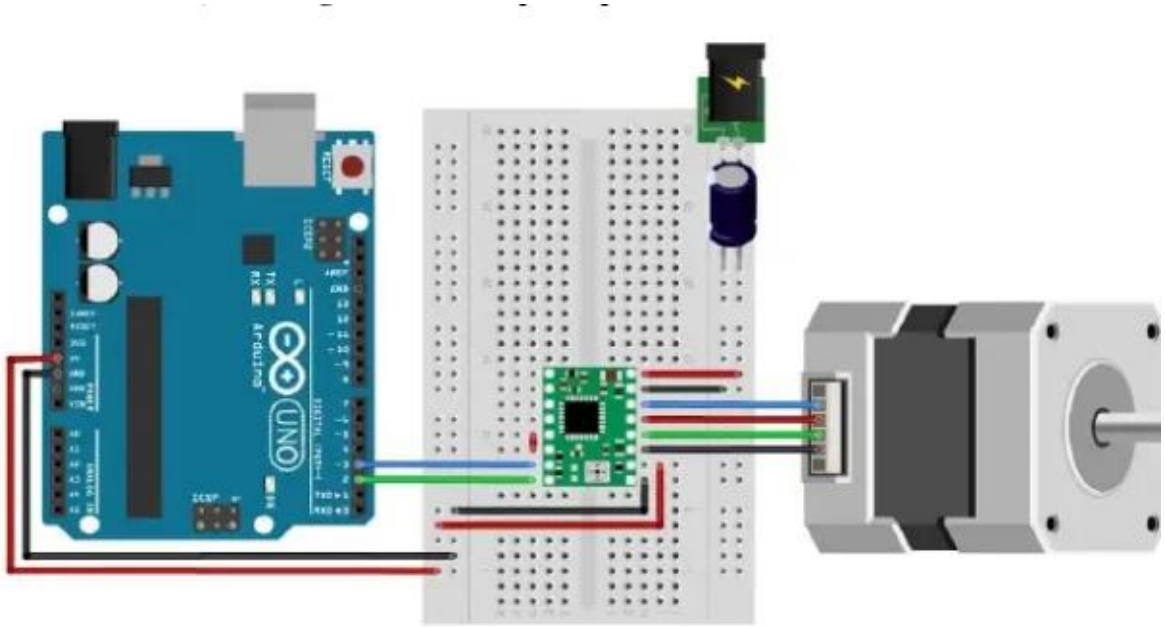


Figure 25 Montage de moteur pas a pas avec l'Arduino uno [15]

3-Montage de boutons poussoirs avec l'Arduino :

- A chaque bouton poussoir doit être connecte une résistance fixe pour éviter des problèmes liés à la lecture numérique du microcontrôleur.

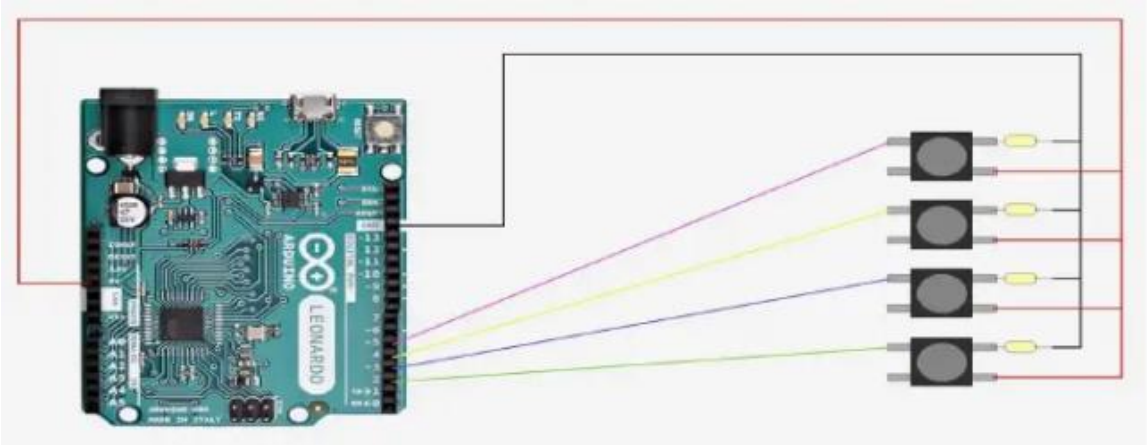


Figure 26 branchement simplifier d'un Arduino avec 4 boutons poussoir [16]

4-Montage de l'écran LCD avec l'Arduino :

L'écran LCD nécessite l'utilisation d'un pilote appelé 12C (Inter-Inter greted Circuit) pour pouvoir être programmé correctement.

L'I2C est un protocole de communication numérique, permettant la communication entre l'écran LCD et le microcontrôleur Arduino.

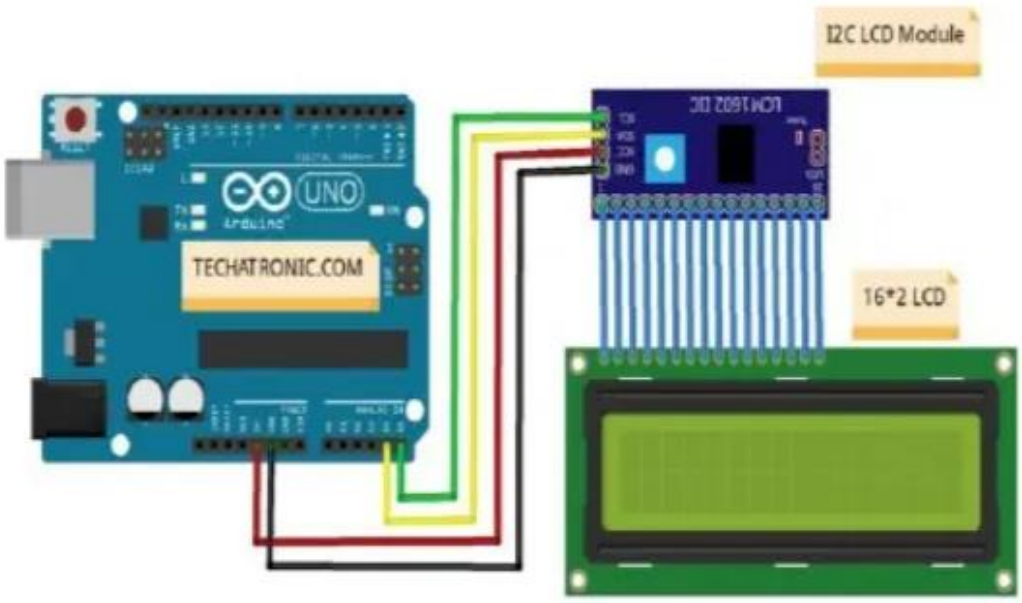


Figure 27 Branchement simplifier d'un Arduino avec l'écran LCD [17]

Mécanisme de fonctionnement :

Suite à la conception des composants prototypes de la machine d'enroulement automatique de transformateurs, les spécifications prédéfinies ont été quasiment entièrement respectées. Grâce à des boutons-poussoirs programmés via Arduino, l'opérateur peut saisir le nombre de spires souhaité. De plus, les moteurs assurent efficacement les mouvements de translation et de rotation liés à l'enroulement des fils de cuivre. Un écran LCD connecté à l'Arduino permet à l'utilisateur de visualiser le nombre de spires réalisées pendant le processus d'enroulement. Enfin, la conception réussie des différents composants de la machine, tels que le chariot et le système de tension du fil, garantit des performances optimales.

Conclusion :

La conception mécanique et électrique d'une bobineuse automatique destinée à l'enroulement des transformateurs monophasés a permis de mettre en évidence l'importance de l'automatisation dans l'amélioration de la précision, de la répétabilité et de la qualité du processus de bobinage. L'objectif principal de ce travail était de

concevoir un système fiable, précis et adaptable aux exigences industrielles, tout en restant économiquement viable.

Sur le plan mécanique, l'étude a conduit à la conception d'une structure rigide et stable assurant un bon maintien des bobines et une réduction significative des vibrations. Le choix approprié des mécanismes de transmission et du système de guidage linéaire a permis d'assurer un enroulement régulier du fil, condition essentielle pour garantir les performances électriques et thermiques du transformateur.

Du point de vue électrique et électronique, l'intégration de moteurs pas à pas commandés par un microcontrôleur a offert un contrôle précis de la vitesse, du sens de rotation et du nombre de spires. L'utilisation d'un système de commande programmable a permis d'automatiser le processus de bobinage, de réduire les erreurs humaines et d'augmenter la productivité. De plus, la synchronisation entre le mouvement de rotation et le déplacement linéaire du guide-fil a assuré une répartition homogène des spires sur la bobine.

Chapitre 4

Test de simulation et résultats

1. Introduction

Ce chapitre présente les différents **tests fonctionnels** et les **résultats de simulation** réalisés afin de valider le bon fonctionnement de la bobineuse automatique de transformateur monophasé basse puissance.

L'objectif principal de ces tests est de vérifier la **cohérence de l'algorithme de commande**, la **synchronisation entre la rotation du mandrin et le déplacement du guide-fil**, ainsi que la **fiabilité de l'interface utilisateur** avant la réalisation du prototype physique.

Les simulations ont été menées en conditions proches du fonctionnement réel, en tenant compte des paramètres mécaniques et électriques du système.

2. Environnement de test et de simulation

Les tests ont été réalisés à l'aide des éléments suivants :

- **Carte de commande** : Arduino Uno
- **Driver moteur pas à pas** : M545D
- **Moteurs pas à pas** :
  - un moteur pour la rotation du mandrin
  - un moteur pour le déplacement linéaire du guide-fil
- **Interface utilisateur** :
  - écran LCD I2C 16×2
  - boutons UP, DOWN, OK et START
- **Simulation logicielle** :
  - vérification du code sur l'IDE Arduino
  - simulation du comportement logique des entrées/sorties

Les paramètres testés incluent :

- nombre total de spires,
- largeur de la bobine,
- diamètre du fil,
- vitesse de rotation (via le délai entre impulsions).

Les figures suivantes présentent les organigrammes détaillés de la partie commande, illustrant la logique séquentielle du système et les différentes phases de fonctionnement.

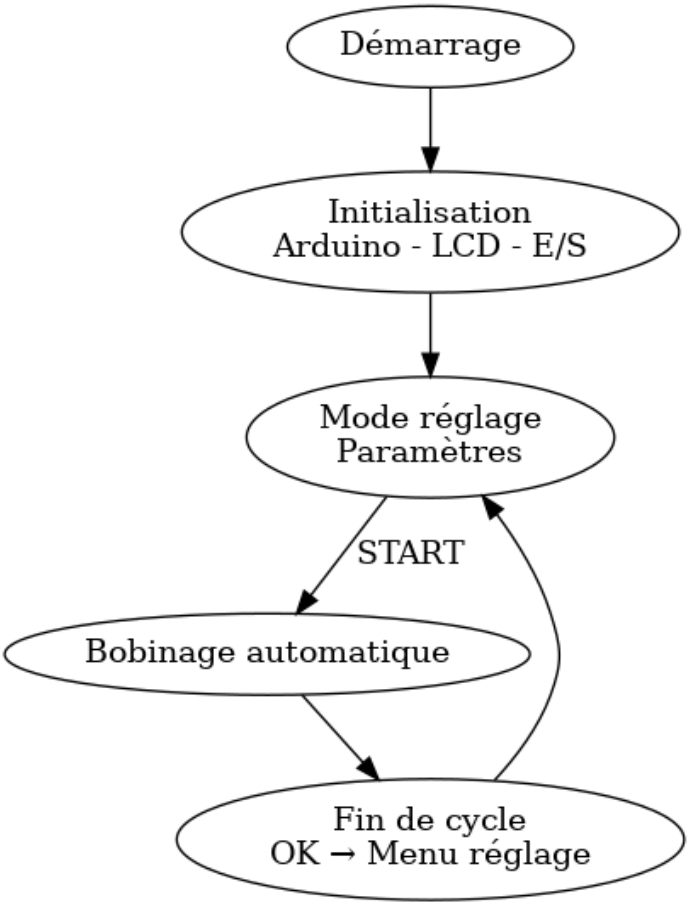


Figure 4.1 : Organigramme général du système de commande de la bobineuse automatique

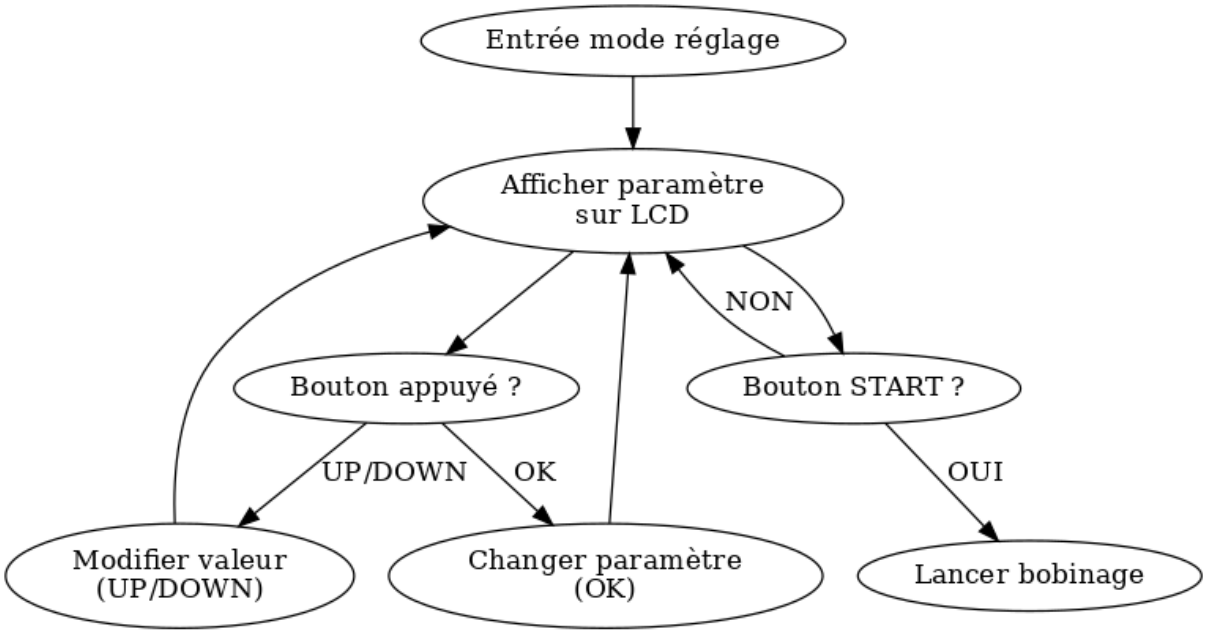


Figure 4.2 : Organigramme du mode réglage des paramètres de la bobineuse automatique.

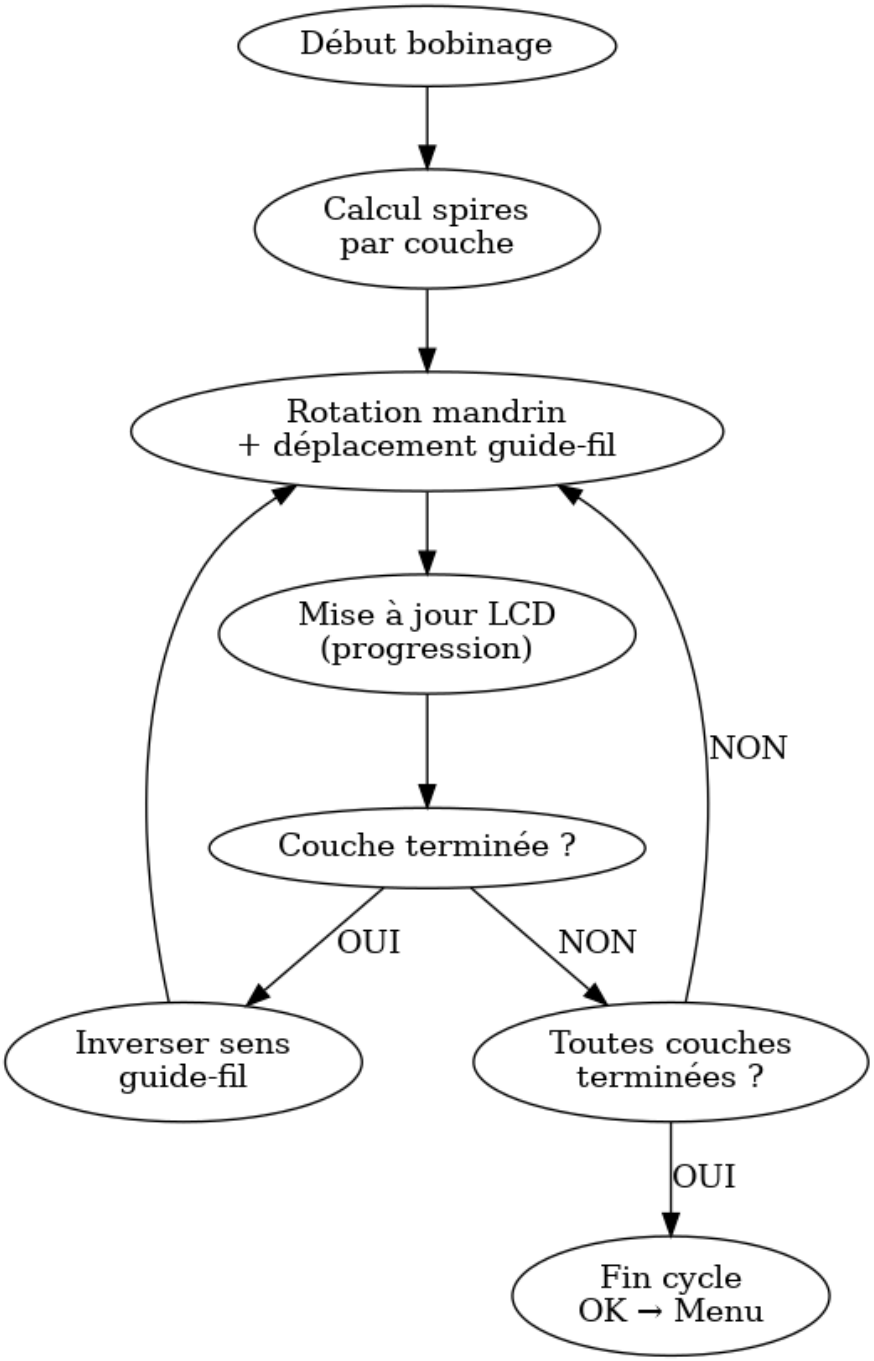


Figure 4.3 : Organigramme du cycle de bobinage automatique du transformateur monophasé.

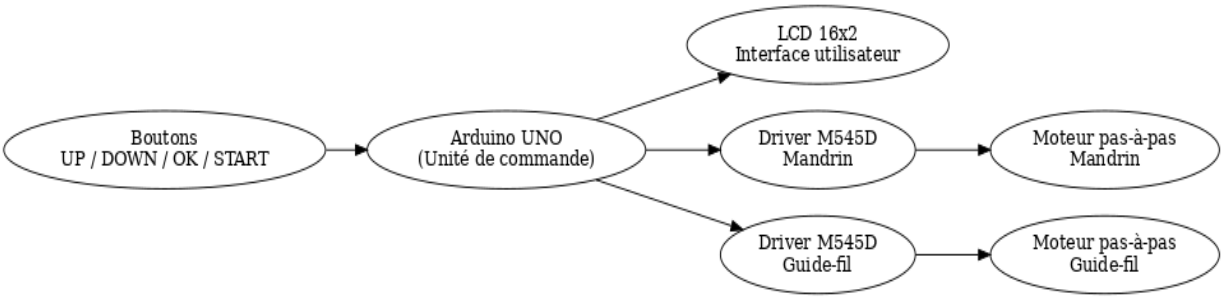


Figure 4.5 : Schéma bloc fonctionnel de la bobineuse automatique à base d'Arduino.

3. Tests de l’interface utilisateur

3.1 Test du menu de réglage

Le premier test consiste à vérifier le bon fonctionnement du **menu de réglage** :

- Le bouton **OK** permet de naviguer entre les paramètres :
  - nombre de spires,
  - largeur de la bobine,
  - diamètre du fil.
- Les boutons **UP** et **DOWN** modifient la valeur du paramètre sélectionné.
- Les valeurs modifiées sont immédiatement affichées sur l’écran LCD.

Résultat :
Le menu répond correctement aux actions de l’utilisateur, les valeurs sont mises à jour en temps réel et affichées sans ambiguïté. Le calcul automatique du nombre de couches est correctement actualisé à chaque modification.

3.2 Test du bouton START

Le bouton **START** a été testé pour vérifier :

- le passage du mode réglage au mode bobinage,
- le verrouillage des paramètres durant l’exécution.

Résultat :
L’appui sur START lance correctement le cycle de bobinage et empêche toute modification des paramètres pendant l’exécution, garantissant ainsi la stabilité du processus.

4. Tests de synchronisation mandrin / guide-fil

4.1 Principe de synchronisation

La synchronisation est basée sur :

- une rotation complète du mandrin correspondant à une spire,
- un déplacement linéaire du guide-fil égal au diamètre du fil pour chaque spire.

Le déplacement du guide-fil est donc strictement proportionnel au nombre de spires effectuées.

4.2 Résultats de simulation

Lors des tests :

- chaque impulsion envoyée au moteur du mandrin est accompagnée d’une impulsion synchronisée au moteur du guide-fil,

- la largeur occupée sur la bobine augmente progressivement et uniformément.

Résultat :
La simulation montre une **répartition homogène des spires** sur chaque couche, sans chevauchement ni espace excessif, validant ainsi l'algorithme de synchronisation.

5. Tests du calcul automatique des couches

Le nombre de spires par couche est calculé selon la relation :

$$N_{Spires/couche} = \frac{\text{Largeur de la Bobine}}{\text{diametre du fil}}$$

Le nombre total de couches est ensuite déterminé automatiquement.

Résultats

- Le calcul est cohérent pour différentes valeurs de largeur et de diamètre.
- Le système adapte automatiquement le nombre de couches en fonction des paramètres saisis.

Résultat :
Le calcul automatique permet une grande flexibilité et réduit considérablement les erreurs humaines lors du réglage.

6. Tests de l'affichage en cours de bobinage

Pendant le bobinage, l'écran LCD affiche :

- le numéro de la couche en cours,
- une barre de progression représentant la **largeur occupée sur la couche**.

Résultats

- La barre de progression évolue proportionnellement au nombre de spires réalisées sur la couche.
- L'opérateur peut visualiser clairement l'avancement du bobinage.

Résultat :
L'affichage améliore significativement l'ergonomie et permet un suivi visuel efficace du processus.

7. Test de fin de cycle et retour au menu

À la fin du bobinage :

- le moteur est désactivé via le signal **ENA_DRIVER**,
- l'écran affiche un message indiquant la fin du cycle,
- l'appui sur le bouton **OK** permet de revenir automatiquement au menu de réglage.

Résultat :
Le retour au menu est immédiat et fiable, ce qui facilite l'enchaînement de plusieurs bobinages successifs sans redémarrage du système.

8. Analyse globale des résultats

Les tests et simulations réalisés montrent que :

- l'algorithme de commande est stable et cohérent,
- la synchronisation mécanique est respectée,
- l'interface utilisateur est intuitive et fonctionnelle,
- le système est adaptable à différents transformateurs basse puissance.

Ces résultats confirment la **validité du concept proposé** et démontrent que la solution développée constitue une base solide pour une implémentation matérielle réelle.

Discussion

Cette section a pour objectif d'analyser de manière critique les résultats obtenus lors des **tests et simulations** du système de bobineuse automatique de transformateur monophasé basse puissance.
La discussion scientifique permet de mettre en évidence les **apports du travail réalisé**, d'évaluer les **performances du système**, d'identifier les **limites** et de proposer des **axes d'amélioration**.

Les analyses portent à la fois sur :

- l'architecture de commande,
- la synchronisation électromécanique,
- l'interface utilisateur,
- la pertinence des choix technologiques.

2. Analyse de l'architecture de commande

2.1 Choix d'une commande numérique centralisée

Le choix d'une architecture basée sur une **carte Arduino Uno** constitue un compromis pertinent entre :

- simplicité de mise en œuvre,
- flexibilité de programmation,
- coût réduit.

L'architecture centralisée permet :

- un contrôle précis des moteurs pas à pas,
- une gestion efficace des entrées/sorties,
- une intégration aisée de nouvelles fonctionnalités.

D'un point de vue scientifique, ce choix est cohérent avec les systèmes de **commande numérique discrète**, largement utilisés dans les machines automatisées de petite et moyenne puissance.

2.2 Approche séquentielle de l'algorithme

L'algorithme de commande repose sur une **approche séquentielle**, structurée autour de plusieurs états :

- mode réglage,
- mode bobinage,
- fin de cycle.

Cette approche présente plusieurs avantages :

- facilité de compréhension,
- fiabilité d'exécution,
- simplicité de débogage.

Cependant, elle présente aussi une limite :
☞ l'absence de **gestion multitâche avancée** (temps réel strict).
Pour des applications industrielles à grande vitesse, une implémentation basée sur un **RTOS** pourrait être envisagée.

3. Synchronisation mandrin – guide-fil

3.1 Précision de la synchronisation

Les résultats de simulation montrent que la synchronisation entre :

- la rotation du mandrin,
- le déplacement linéaire du guide-fil,

est assurée de manière déterministe grâce à la génération simultanée des impulsions STEP.

Cette méthode garantit :

- une correspondance directe entre une spire et un déplacement égal au diamètre du fil,
- une répartition uniforme des spires sur chaque couche.

Scientifiquement, cette approche s'apparente à une **commande ouverte synchronisée**, adaptée lorsque :

- les paramètres mécaniques sont bien connus,
- les perturbations externes sont limitées.

3.2 Limites de la commande en boucle ouverte

Malgré ses bons résultats, la commande en boucle ouverte présente certaines limites :

- absence de retour d'information sur la position réelle,
- sensibilité aux glissements mécaniques,
- dépendance à la qualité du moteur et du guidage.

Dans un contexte industriel, ces limites pourraient être levées par :

- l'ajout d'encodeurs,
- l'implémentation d'une commande en boucle fermée,
- l'utilisation de moteurs à retour de position intégré.

4. Analyse de l'interface homme-machine (IHM)

4.1 Ergonomie et simplicité

L'intégration d'un **LCD 16×2 avec interface I2C** et de boutons poussoirs permet une interaction simple et intuitive.
Les tests montrent que l'utilisateur peut :

- configurer rapidement les paramètres,
- suivre l'avancement du bobinage,
- relancer un cycle sans redémarrage du système.

L'affichage de la **barre de progression représentant la largeur occupée** constitue un apport ergonomique significatif, transformant une information abstraite (nombre de spires) en une information visuelle concrète.

4.2 Robustesse de l'IHM

Le retour automatique au menu de réglage après la fin du bobinage améliore :

- la continuité d'utilisation,
- la productivité,
- la sécurité opérationnelle.

Ce comportement s'inscrit dans les principes modernes de conception des IHM industrielles, privilégiant la **réversibilité des actions** et la **réduction des erreurs humaines**.

5. Discussion sur la partie électronique

5.1 Séparation commande / puissance

La simulation Proteus met en évidence une séparation claire entre :

- la partie commande (Arduino, logique),
- la partie puissance (drivers moteurs, alimentation).

Cette séparation est essentielle pour :

- limiter les perturbations électromagnétiques,
- améliorer la fiabilité globale,
- faciliter la maintenance.

D'un point de vue scientifique et industriel, cette approche est conforme aux bonnes pratiques en **électronique de puissance et automatisme**.

5.2 Validation par simulation Proteus

L'utilisation de Proteus a permis :

- de valider les connexions,
- d'anticiper les erreurs de câblage,
- de vérifier la cohérence du comportement global.

La simulation constitue ainsi une **étape intermédiaire essentielle** entre la conception théorique et la réalisation physique, réduisant le temps et le coût de développement.

6. Apports scientifiques et techniques du travail

Le travail réalisé apporte plusieurs contributions notables :

- intégration complète d'un système de bobinage automatisé à faible coût,
- développement d'un algorithme paramétrable adaptable à différents transformateurs,
- validation conjointe logicielle et électronique par simulation,
- amélioration de l'ergonomie par une visualisation intuitive du processus.

Ces apports sont particulièrement pertinents dans un contexte :

- pédagogique,
- de prototypage rapide,
- de petite production.

7. Limites du système développé

Malgré ses performances satisfaisantes, certaines limites ont été identifiées :

- absence de capteur de tension du fil,
- absence de détection de rupture du fil,
- vitesse limitée par la commande logicielle,
- absence de sauvegarde permanente des paramètres.

Ces limites n'invalident pas le système, mais définissent clairement son **domaine d'application**.

8. Perspectives d'amélioration et travaux futurs

Les perspectives d'évolution incluent :

- ajout d'encodeurs pour un contrôle en boucle fermée,
- intégration d'un arrêt d'urgence matériel,
- sauvegarde des paramètres dans l'EEPROM,
- amélioration de la vitesse via timers matériels,
- intégration d'un écran graphique.

Ces améliorations permettraient d'approcher une **solution semi-industrielle**.

9. Conclusion

La discussion scientifique met en évidence que le système développé constitue une **solution cohérente, fonctionnelle et techniquement justifiée** pour le bobinage automatique de transformateurs monophasés basse puissance.

Les choix effectués, validés par simulation, démontrent une bonne maîtrise des concepts de :

- commande numérique,
- automatisme,
- électronique embarquée.

Les tests et résultats de simulation ont permis de valider l'ensemble des fonctionnalités de la bobineuse automatique.
Le système répond aux exigences de précision, de flexibilité et d'ergonomie requises pour la fabrication de transformateurs monophasés basse puissance.

Ce travail ouvre la voie à une réalisation pratique du prototype ainsi qu'à de futures améliorations, telles que l'ajout de capteurs de tension du fil ou d'un système de sécurité avancé. Il constitue ainsi une base solide pour des développements ultérieurs et une implémentation pratique

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, la conception et la réalisation d'une bobineuse automatique dédiée aux transformateurs monophasés basse puissance constituent une contribution technique et scientifique pertinente dans le domaine de l'électrotechnique et de l'automatisation. L'étude approfondie des transformateurs monophasés a permis de mettre en évidence l'importance déterminante de la qualité de l'enroulement des bobines, qui influe directement sur les performances globales du transformateur, notamment en termes de rendement, de pertes électriques, d'échauffement et de fiabilité à long terme. La précision du bobinage apparaît ainsi comme un facteur clé pour garantir l'efficacité énergétique et la qualité du produit final.

Par ailleurs, l'analyse technologique des bobineuses, qu'elles soient manuelles, semi-automatiques ou automatiques, a permis d'identifier les spécificités, les avantages et les limites de chaque solution existante. Cette étude comparative a servi de base solide pour le choix des composants et de l'architecture du système développé. L'intégration de composants modernes tels que les moteurs pas à pas, les drivers de puissance et un microcontrôleur programmable a permis de mettre en œuvre une commande précise, répétable et fiable du processus de bobinage. Cette approche a rendu possible le contrôle fin du nombre de spires, de la vitesse de rotation du mandrin et de la synchronisation avec le déplacement du guide-fil, assurant ainsi une répartition homogène des spires sur chaque couche.

L'automatisation du processus d'enroulement a également permis de réduire significativement les erreurs humaines liées aux opérations manuelles, tout en améliorant la qualité et la régularité des bobines produites. En conséquence, les pertes de puissance dues à des enroulements imparfaits sont limitées, ce qui se traduit par une amélioration du rendement des transformateurs réalisés. De plus, l'utilisation d'une bobineuse automatique contribue à une augmentation notable de la productivité, à une réduction du temps de fabrication et à une diminution des coûts de main-d'œuvre, rendant cette solution particulièrement attractive pour les petites et moyennes unités de production ainsi que pour les applications pédagogiques et de prototypage.

Grâce à la phase de modélisation, de simulation et à l'assemblage complet des différents sous-systèmes mécaniques, électroniques et logiciels, il a été possible de concevoir et de réaliser un prototype fonctionnel de bobineuse automatique de transformateur monophasé. Les tests et simulations effectués ont permis de valider le bon fonctionnement du système, la cohérence de l'algorithme de commande ainsi que l'efficacité de la synchronisation électromécanique. Le prototype développé est ainsi capable d'enrouler automatiquement des bobines de transformateurs avec une précision satisfaisante, tout en offrant une interface utilisateur simple et intuitive.

Enfin, ce travail ouvre des perspectives intéressantes pour de futures améliorations, telles que l'intégration de capteurs pour un contrôle en boucle fermée, l'optimisation des performances dynamiques ou encore l'adaptation du système à des transformateurs de puissances plus élevées. Il constitue ainsi une base solide pour des développements ultérieurs et une éventuelle industrialisation de la solution proposée.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[1] Jeong Hyunjae. Coil winding Machine. Bachelor of Mechanical Engineering. Department of Instrumentation and Control Engineering. Information and Automation Technology. Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague. 202

[2] website : https://delorenzoglobal.com/fr/produit/bobineuse-manuelle/

[3] Semi Automatic Transformer Winding Machine For HV Coils. Disponible sur :

https://www.zenithar.net/semi-automatic-transformer-winding-machine-for-hv-coils . Oct 2023

[4]website : https://www.zenithar.net/fr/bobinage-automatique-de-transformateur-de-distribution/

[5] website : https://french.alibaba.com/product-detail/Expandable-Mandrel-for-Coil-Winding-Machine-60726691124.html

[6] Prajval Vaskar, P. ; Suraj Zambare, P. ; Shraddha Waje, P. ; Rushabh Vhora, P. (2018).Design and developpement of automatic coil winding machine. International Research Journal of Engineering and Technology, vol. 5, issue 6, p. 1389-1393

[7] Jie-Shiou Lu, P. ; Ming-Yang Cheng, P. ; Ke-Han Su, P. ; Mi-Chi Tsai, P. (2018). Wire tension control of an automatic motor winding machine-an iterative learning sliding mode control approach. Robotics and computer-Integrated Manufacturing, vol. 50, p.50-62

[8]. HV wire winding machines for distribution transformers. Wire winding machine of the WHL series. Disponible sur : https://www.tuboly-astronic.ch/products/coil-winding/hv-wire winding-machines/ . Oct 2023

[9] E551ETCEC – Cours Electrotechnique, année 2023 ; Électronique Numérique ; Mention Electronique - École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2022-2023

[10] website : https://www.coursuniversel.com/transformateurs/

[11] website : https://fr.scribd.com/document/567257982/elt532-chap2

[12] SolidWorks 2018 sur https://www.solidworks.com

[13] Proteuse8 Professionnel

[14] website : https://www.dzduino.com

[15] Arduino. *Stepper Motor Control with Arduino*

[16] Arduino. *Digital Input Pull-up Resistor*.

[17] Arduino. *LiquidCrystal I2C LCD*.

[18] Transformer and Inductor Design Handbook – Colonel Wm. T. McLyman

[19] Transformer Winding Book

[20] Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics

[21] Electromagnetic transients in transformer and rotating machine windings

[22] Transformateurs électriques – Théorie et pratique

[23] Électrotechnique – Machines et transformateurs

[24] Electric Motor and Transformer Rewinding

[25] Electric Transformers and Power Equipment