



TALLINNA TEHNICAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Virumaa kolledž

**AUMIINIUM LÜHISROOTORITE KEEVITUSPROTSESSI
AUTOMATISEERIMISE PROJEKT ABB MOOTORITE JA
GENERAATORITE TEHASE NÄITEL**

**A project to automate the welding process of aluminum squirrel-
cage rotors by M&G factory ABB**

TOOTMISE AUTOMATISEERIMINE ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Aleksei Tšebotarjov

Üliõpilaskood: 178730RDDR

Juhendaja: Sergei Pavlov, lektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“23” mai 2021.

Autor: .. Aleksei Tšebotarjov.....

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle/magistritööle esitatud nõuetele

“23” mai 2021.

Juhendaja: ..Sergei Pavlov.....allkirjastatud digitaalselt.....

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“24” mai 2021.

Kaitsmiskomisjoni esimeesSergei Pavlov

/ allkirjastatud digitaalselt /



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Virumaa kolledž

**ПРОЕКТ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ СВАРОЧНОГО ПРОЦЕССА
КОРОТКОЗАМКНУТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ РОТОРОВ НА
ЗАВОДЕ ДВИГАТЕЛЕЙ И ГЕНЕРАТОРОВ НА ПРИМЕРЕ
ABB**

TOOTMISE AUTOMATISEERIMINE ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Студент: Aleksei Tšebotarjov

Код студента: 178730RDDR

Руководитель: Sergei Pavlov, лектор

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS

Mina Aleksei Tšebotarjov (sünnikuupäev: 25.07.1976)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Alumiinium lühisrootorite keevitusprotsessi automatiseerimise projekt ABB mootorite ja generaatorite tehase näitel“ mille juhendaja on Sergei Pavlov,
 - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Aleksei Tšebotarjov, 178730 RDDR

Õppekava, peeriala: RDDR08/17 Tootmise automatiseerimine

Juhendaja(d): Lektor, Sergei Pavlov, sergei.pavlov@taltech.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Alumiinium lühisrootorite keevitusprotsessi automatiseerimise projekt ABB mootorite ja generaatorite tehase näitel

(inglise keeles) A project to automate the welding process of aluminum squirrel-cage rotors by M&G factory ABB

(vene keeles) Проект по автоматизации сварочного процесса короткозамкнутых алюминиевых роторов на заводе двигателей и генераторов на примере ABB

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Toodetavate rootorite ülevaade ja erisused
2. Lühisrootorite koostamise tehnoloogia
3. Tehnilise lähteülesande analüüs, lahendusvariandid
4. Lahendusvariandi valik analüüsi põhjal ja rakendamine

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö plaani koostamine	14.02.21
2.	Lõputöö ülesande esitamine	22.02.21
3.	Kogutud materjali läbitöötamine	28.02.21
4.	Ülevaade eri tüüpi rootoritest ja nende võrdlus	15.03.21
5.	Koostetehnoloogia ülevaade ja võrdlus	31.03.21
6.	Tehnilise ülesande kirjeldus, analüüs ning lahendusvariandid	14.04.21

7.	Tootmisseadmete valik ja teostus	04.05.21
8.	Lõputöö korrektsioon ja vormistamine	07.05.21
9.	Lõputöö avalduse esitamine	10.05.21
10.	Eelkaitsmine	19.05.21
11.	Lõputöö kaitsmine	08.06.21

Töö keel: Vene

Lõputöö esitamise tähtaeg:

"01" JUUNI 2021a

Üliõpilane: Aleksei Tšebotarjov

/ allkirjastatud digitaalselt /

"24"veebruar 2021a

Juhendaja: Sergei Pavlov

/ allkirjastatud digitaalselt /

"24"veebruar 2021a

Konsultant:

/allkiri/

"....."..... 20.....a

Programmijuht:

/allkiri/

"....."..... 20.....a

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	8
Введение	9
1. Виды роторов и Краткое описание технологии.....	10
1.1 Виды роторов и их особенности	10
1.2 Что такое короткозамкнутый ротор	11
1.3 Различия между алюминиевым и медным короткозамкнутым роторами	12
1.4 Технология сборки короткозамкнутых роторов.....	12
2. Техническое задание	18
2.1 Человек или робот	18
2.2 Экономическая эффективность	18
2.3 Выбор оборудования	21
2.4 Типовые решения	24
3. Выбор решения и возможная реализация	30
Заключение	32
Kokkuvõtte	33
Summary	34
Использованные источники	35

ПРЕДИСЛОВИЕ

Темой данной дипломной работы является автоматизация сварочного процесса алюминиевых короткозамкнутых роторов. В ходе работы были использованы исходные данные, предоставленные заводом АВВ в Эстонии. Для создания концептуальных моделей автором были применены навыки работы в средах Autodesk Inventor Professional и RobotStudio.

Хочу поблагодарить Николая Волчихина за организацию курсов по обучению программированию в RobotStudio.

Ключевые слова: автоматизация, сварочный процесс, сварочный робот, короткозамкнутый ротор, токарный станок с ЧПУ, дипломная работа.

ВВЕДЕНИЕ

Компания ABB AS является крупнейшей компанией в мире, специализирующаяся в области электротехники, энергетического машиностроения и информационных технологий.

В 2002 году начал свою деятельность завод в Эстонии, Юри (Harjumaa). Завод в Эстонии занимается сборкой генераторов и производством компонентов (статоры, роторы, стальные заготовки для сборки статоров и роторов), составляющих 30% и 70% производственных мощностей, соответственно.

Завод ABB AS в Эстонии никогда раньше не производил двигатели с алюминиевым короткозамкнутым ротором. Производство таких роторов расширило бы ассортимент предлагаемых продуктов, и, как следствие, увеличило число клиентов.

Целью данной дипломной работы является разработка проекта по автоматизации сварки алюминиевых короткозамкнутых роторов с учетом ограниченности в производственной площади на примере ABB AS. Для решения поставленной задачи будут рассмотрены три возможных варианта интеграции роботизированной сварочной станции с токарным станком с ЧПУ. Все концепции будут разработаны и смоделированы автором в среде Autodesk Inventor Professional. Линии производства будут визуализированы при помощи программы RobotStudio.

На основе анализа слабых и сильных сторон вариантов реализации проекта будет сделан выбор оптимального из них.

1. ВИДЫ РОТОРОВ И КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

1.1 Виды роторов и их особенности

Наиболее распространенный класс электрических машин — это асинхронный двигатель. В зависимости от конструкции ротора асинхронные двигатели бывают с **короткозамкнутым** и с **фазным** роторами [1]. Ротор — вращающаяся часть электрических машин, которая выполняется в виде барабанов, дисков, колёс [2]. Короткозамкнутый ротор представляет собой сердечник, набранный из листов электротехнической стали толщиной 0,5мм. В пазы этого сердечника вставляются алюминиевые шины, которые замыкаются накоротко торцевыми кольцами. В двигателях большой мощности вместо алюминия применяются медь. [3]

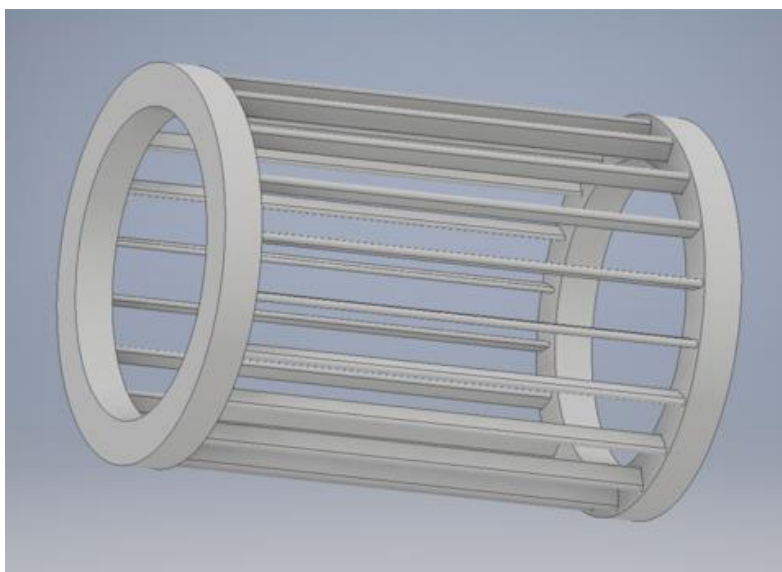
Принципиальное отличие **фазных роторов** — это наличие фазной обмотки, выполняемой подобно статорной, с тем же числом полюсов. Соединение фаз обмотки может быть выполнено в виде треугольника или звезды [4].

Широкое распространение асинхронный двигатель с фазным ротором получил за счет ряда серьезных преимуществ перед другими машинами подобного рода. Среди них следует отметить большой вращающий момент при запуске, а также относительно постоянную скорость вращения даже при высоких нагрузках. Такие электродвигатели для запуска требуют меньший пусковой ток, а конструкция позволяет использовать автоматические пусковые устройства. Кроме того, эти электрические машины хорошо переносят продолжительные перегрузки. [5]

Как и любой электрический механизм, электродвигатели с фазным ротором имеют ряд недостатков:

- чувствительность к перепадам напряжения;
- большие габаритные размеры
- высокая стоимость;
- более сложная конструкция за счет цепи ротора с добавочным сопротивлением;
- меньшие показатели коэффициента мощности и КПД (относительно асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором). [5]

Короткозамкнутые роторы отличаются от фазных тем, что у них отсутствует обмотка, а её функции выполняют стержни из металла, замкнутые с обоих концов между собой. Такую конструкцию часто называют «беличьей клеткой». Действительно, короткозамкнутый ротор устроен так, что движения его в статоре напоминают колесо, которое вращает белка. Часто роль стержней выполняет металл: алюминий или медь, установленный в пазы сердечника (рис. 1.1).



1.1. Конструкция короткозамкнутого ротора «беличья клетка»

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором обладает высокой надежностью за счет отсутствия щеток, которые со временем перетираются. Кроме того, их стоимость меньше, чем у вариантов с фазным ротором. [5] Кроме того двигатели с таким ротором удобны в эксплуатации и просты по устройству.

1.2 Что такое короткозамкнутый ротор

Короткозамкнутый ротор представляет собой сердечник, набранный из листов, стали. В пазы этого сердечника вставляется медь или алюминий в виде стержней, которые замыкаются накоротко торцевыми кольцами. Эта конструкция называется "беличьей клеткой". [3] Стержни такой обмотки вставляются в пазы ротора без изоляции, так как напряжение в короткозамкнутой обмотке равно нулю. Пазы короткозамкнутого ротора обычно выполняют полузакрытыми, а в машинах малой мощности — закрытыми (паз имеет стальной ободок, отделяющий его от воздушного зазора). Такая форма паза позволяет хорошо укрепить проводники обмотки ротора, хотя и несколько увеличивает ее индуктивное сопротивление.

Среди всех преимуществ двигателей с короткозамкнутым ротором можно выделить:

- одинаковая скорость с применением разных нагрузок;
- допустимость больших рабочих перегрузок;
- простота и удобство автоматизации пуска;
- высокие показатели КПД;
- конструктивная простота.

1.3 Различия между алюминиевым и медным короткозамкнутым роторами

В двигателях мощностью до 100 кВт стержни «беличьей клетки» выполнены из алюминия, так как он обладает малой плотностью, достаточно высокой электропроводностью и легко сваривается. Торцовые коротко замыкающие кольца соединяются со стержнями путем сваривания. WPS (*Welding Procedure Specification*) рекомендует использовать сварочную проволоку Autrod 4043 - SG-ALSi5. К тому же ротор с алюминиевыми стержнями легче и в разы дешевле меди.

В двигателях большой мощности вместо алюминия применяется медь, которая замыкается с коротко замыкающими кольцами путем пайки.

1.4 Технология сборки короткозамкнутых роторов

Технология сборки короткозамкнутых роторов с медными и алюминиевыми шинами на начальном этапе не имеет отличий. Сердечник ротора укладывают в пакет из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Укладка пакета начинается с подготовки оправки с соответствующим проекту диаметром вала (Рис.1.2).



Рисунок 1.2. Подготовка оправки

Далее листы электротехнической стали надеваются на оправку, образуя сердечник ротора в виде модулей, которые разделены между собой радиальными вентиляционными каналами (Рис.1.3). [6]



Рисунок 1.3. Листы воздушшек, листы модулей и сердечник ротора

После сердечник статора прессуют с силой, указанной в технической документации. Если высота пакета соответствует техническим требованиям, пакет стягивают при помощи шпилек для сохранения длины, жесткости, уменьшения зазоров между листами и обеспечения монолитности (рис. 1.4).

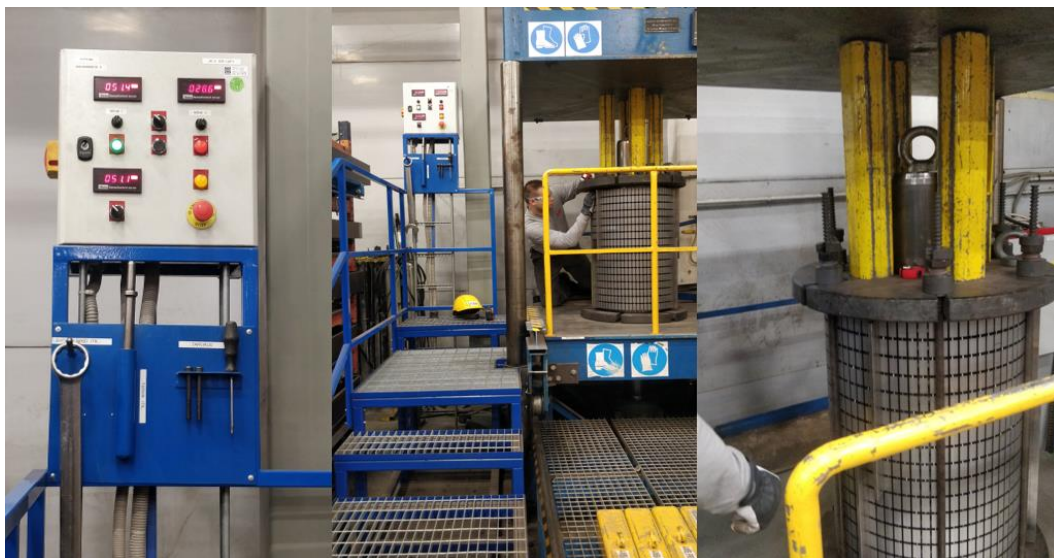


Рисунок 1.4. Прессовка сердечника статора

Затем пакет нагревают до температуры 300°C и выдерживают в печи примерно 3 часа. После чего происходит установка вала в сердечник. Сердечник ротора крепится на валу горячей посадкой и прессуется (Рис. 1.5).



Рисунок 1.5. Нагрев и установка вала

В таком положении ротор остывает до комнатной температуры, после чего в пазы ротора устанавливаются стержни. Выбор стержней: медь или алюминий, устанавливаются в зависимости от типа машины (Рис. 1.6).



Рисунок 1.6. Установка алюминиевых и медных стержней

После установки всех стержней ротор идет в машину, которая расклинивает их путем пробивки. Делается это для того, чтобы при механической обработке стержни не двигались в пазах ротора (рис 1.7).

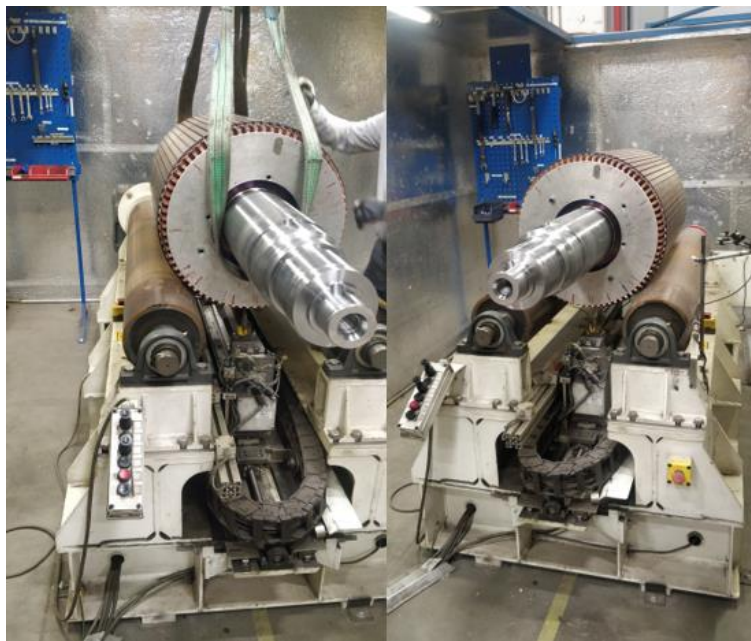


Рисунок 1.7. Расклинивание стержней

Далее следует механическая обработка концов стержней под посадочное место в кольце короткого замыкания. На этом этапе сходства в сборке роторов с алюминиевыми и медными стержнями заканчиваются. Ротор с медными стержнями замыкается при помощи пайки замыкающих колец смесью горячего газа и кислорода (Рис. 1.8).



Рисунок 1.8. Пайка замыкающих колец

Ротор с алюминиевыми стержнями замыкается с кольцами путем сваривания между собой полуавтоматической сваркой с использованием инертного газа MIG (*Metal Inert Gas*), согласно WPS. Места соединения колец со стержнями приведены ниже (рис.1.9).

Рисунок 1.9. Соединение стержней с кольцами



На рисунке 1.10 приведен пример спецификации процедуры сварки (WPS) SFS-EN ISO 15613 [7] (ISO 15614-2) [8], где указаны: количество проходов и их последовательность, диаметр сварочной проволоки и параметры сварки.

Basic Metals		Classification		CEN ISO/TR 15608:FI		Material thickness				
A= Short-Circuit Ring	ALMgSi 1	EN 12020-2	22.2	45 - 95 mm	-					
B= Rotor bar	AW-EAL MgSi-T6	EN 12020-2	22.2	6 - 10 mm	-					
Welding quality class SFS-EN ISO 30042 / D, for all welds										
<p>Cleaning and welding order</p> <p>Groove has to be cleaned grease free with solvent and oxide free with stainless steel brush As well before welding. Shrinkage pores, cracks or end craters not allowed. Shrinkage pores, cracks or end craters have to be removed by grinding until parent metal before re-welding. Smooth transition is required Visual inspection of the all welds. Visual testing according to SFS-EN ISO 17637 (mandatory)</p>										
Run / Runs	Welding proces	Filler metal Index	Wire size ø /mm	Current (A)	Voltage (V)	Free wire length /mm	Polarity	Trav. speed (mm / sec)	Wire Feed (m/min)	Heat input (kJ/mm)
1-2	131	Autrod 4043	1,6	250-255	28,5	20-25	+	3,6	7,0	1,6
3-5	131	Autrod 4043	1,6	252-257	28,5	20-25	+	3,6	7,0	1,6
4-6	131	Autrod 4043	1,6	250-255	28,5	20-25	+	2,8	7,0	2,0
7-8	131	Autrod 4043	1,6	255-258	28,5	20-25	+	3,4	7,0	1,7

Рисунок 1.10. Пример спецификации процедуры сварки (WPS)

По завершению сварочного процесса излишки сварочного шва удаляют путем механической обработки на токарном станке с ЧПУ. Затем готовый продукт проходит этап балансировки (рис. 1.11).

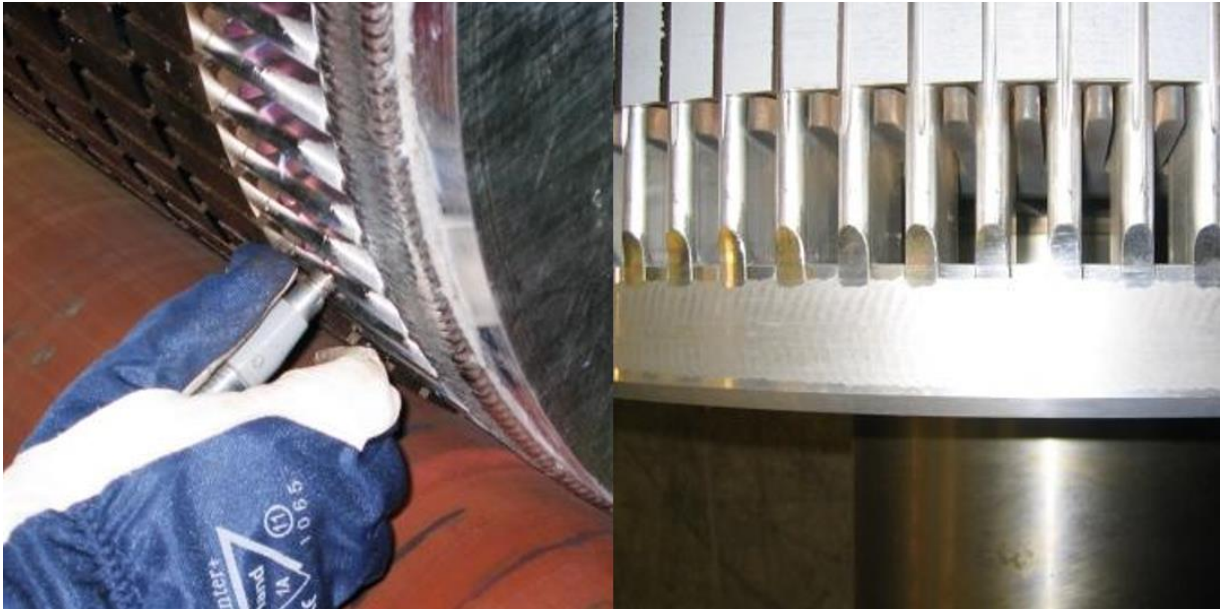


Рисунок 1.11. Сварочный процесс завершен, механическая обработка завершена

На этом процесс сборки короткозамкнутого ротора завершается. Ротор отправляется на балансировку и конечную сборку генератора.

2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Завод АВВ производит асинхронные машины с короткозамкнутыми медными роторами уже давно. Роторы с алюминиевыми стержнями еще не производились из-за отсутствия места и технологии. Поступило задание провести исследование и найти варианты технического решения для реализации проекта сварки алюминиевого короткозамкнутого ротора.

2.1 Человек или робот

На начальном этапе для сваривания стержней с кольцами подразумевалось, что будет использоваться ручной труд. После сборки первого ротора был сделан анализ, в котором учитывались следующие аспекты:

- Количество и отложение вредных паров и частиц в воздухе при сварке алюминия и его сплавов с использованием MIG;
- Высокие температуры;
- Монотонность. Человек не может работать с одним и тем же темпом на протяжении длительного времени;
- Качество.

На основе анализа были определены основные цели:

- Улучшение рабочей среды;
- Повышение производительности сварки;
- Обеспечение качества сварки.

Современные промышленные роботы могут экономить трудозатраты, увеличить объемы производства и качество. Роботы точнее людей и не требуют периодов отдыха. Их самый большой недостаток - программирование и тот факт, что роботы могут быть развернуты только для сильно стандартизированных производственных процессов.

2.2 Экономическая эффективность

Стоимость автоматической сварочной станции составляет примерно 130 000 евро. Для обработки ротора требуется 2 человека, работающих посменно по 8 часов. Стоимость часа работы составляет 10 евро (брутто), без учета отчислений работодателя социальных налогов. Среднее количество рабочих часов в месяц составляет 178. Жизненный цикл сварочного робота составляет 6-13 лет [9].

Для расчетов было решено использовать цикл в 10 лет. В качестве ставки дисконтирования используется WACC (средневзвешенная стоимость капитала) – средняя процентная ставка по всем источникам финансирования предприятия. В 2020 году WACC в группе ABB составлял 6,07% [10].

Формула расчета WACC (средневзвешенная стоимость капитала):

$$WACC = k_d (1 - T) \frac{D}{E+D} + k_e \frac{E}{E+D} \quad [11]$$

k_d - средняя стоимость заемного капитала предприятия;

T - ставка подоходного налога предприятий;

D - сумма заемного капитала;

E - сумма собственного капитала;

k_e - средняя стоимость собственного капитала предприятия;

Таблица 2.1. Исходные показатели, используемые в расчетах

Показатели	Значения
Количество работников	2
Расходы предприятия на рабочую силу, включая налоговые отчисления, в год (CF_t)	56 517,12 евро
Начальный инвестиционный капитал (IC)	130 000 евро
Ставка дисконтирования ($r=WACC$)	6.07%
Жизненный цикл работа (n)	10 лет

Индекс доходности инвестиции

Индекс доходности инвестиции PI (*Profitability Index*) показывает уровень отдачи на вложенную денежную единицу инвестиций.

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n (CF_t / (1+r)^t)}{IC} \quad [12]$$

Индекс доходности проекта составляет $\approx 3,189$, то есть на каждое вложенное евро доходность 3,189 евро. Можно утверждать, что проект по роботизации выгоден для инвестирования.

Срок окупаемости первоначальных инвестиций

Показатель срока окупаемости инвестиций PP (*Payback Period*) дает возможность оценить минимальный срок, за который накопленный доход превысит начальные инвестиции.

$$PP = \frac{IC}{CF_t} \quad [12]$$

Чем быстрее вложенные средства начнут приносить прибыль, тем привлекательнее и менее рискованно вложение. Срок окупаемости вложенных в покупку робота средств составит $\sim 2,3$ года (2 года и 4 месяца), что является достаточно краткосрочной инвестицией.

Коэффициент эффективности инвестиции

Коэффициент эффективности инвестиции ARR (*Accounting Rate of Return*) равен отношению среднегодовой ожидаемой чистой прибыли к среднегодовому объему инвестиций.

$$ARR = \frac{CF_t}{IC} \quad [13]$$

Если полученный коэффициент превышает средневзвешенную стоимость капитала, проект выгоден для внедрения. Коэффициент эффективности инвестиции в робота сварки равен 0,435 (43,5%), что превышает средневзвешенную стоимость капитала 6,07%.

Внутренняя ставка рентабельности

Внутренняя ставка рентабельности IRR (*Internal Rate of Return*) автоматической сварочной станции – процентная ставка, при которой уравнивается приведённая стоимость будущих денежных поступлений и стоимость исходных инвестиций, чистая приведённая стоимость (NPV) равна 0 [14].

$$NPV = -IC + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad [14]$$

Если внутренняя ставка рентабельности (IRR) выше требуемой акционерами средневзвешенной стоимости капитала ($WACC$), то после выплат по заемному капиталу кредиторам останутся средства для выплаты дивидендов или реинвестиций в предприятие. Согласно расчетам, IRR автоматической сварочной станции составил 42,19%, что значительно выше средневзвешенной стоимости капитала.

Подводя итоги, можно утверждать, что внедрение сварочного робота выгодно. Каждый год использования автоматической сварочной станции экономит предприятию АВВ

56 517,12 евро, период окупаемости составит 2,3 года. Основным источником экономии являются расходы на рабочую силу и уменьшение числа операций за счет улучшения технологии. Кроме того, на изготовление одного ротора требуется 16 человеко-часов, роботу требуется лишь 6 часов. Следовательно, следует предпочесть инвестирование в работа человека.

2.3 Выбор оборудования

При выборе оборудования за основу была взята уже имеющейся на производстве роботизированная сварочная станция IRB 2600 (рис. 2.1).

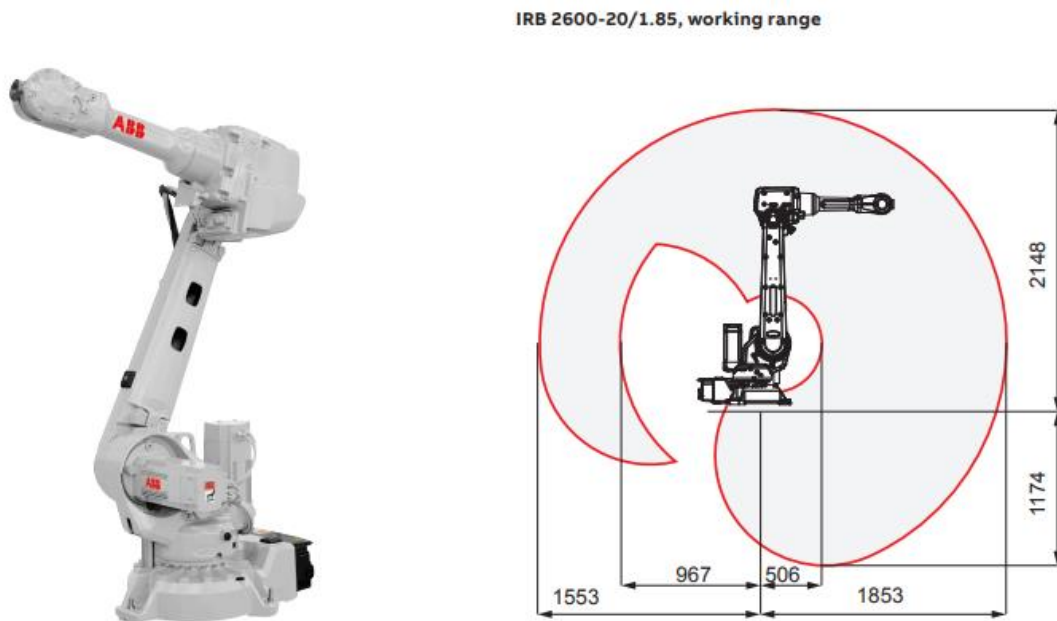


Рисунок 2.1. Робот IRB 2600-20 / 1,85 [15].

Основная работа данной роботизированной станции заключается в сварке статоров электрических машин с высотой вала от 355 до 710 мм. IRB 2600-20 / 1,85- один из небольших, но наиболее предпочтительных роботов. Эти роботы имеют 6 степеней свободы и используются в основном для обслуживания, склеивания, сварки и шлифования [15]. Конструкция и большая рабочая зона делают этот робот быстрым и точным. В автоматическом режиме максимальная скорость робота равна 250 мм/с [15].

Робот управляется контроллером IRC 5 (рис. 2.2).



Рисунок 2.2. Контроллер IRC5 [16].

К контроллеру может быть подключено до четырех роботов и шесть независимых задач. Контроллер имеет большой объем памяти, программы могут быть загружены непосредственно с компьютера и через Интернет (рис.2.3) [16].

Machine Interfaces	
Inputs/outputs:	Up to 8192 signals
Digital:	24V DC or relay signals
Analogue:	2 x 0-10V, 3 x \pm 10V, 1 x 4-20mA
Serial channel:	1 x RS 232/RS 422 with adapter
Network:	Ethernet(10/100 Mbits per second)
Two channels:	Service and LAN
Fieldbus Master:	DeviceNet™ PROFINET PROFIBUS DP Ethernet/IP™
Fieldbus Slave:	DeviceNet™ PROFINET PROFIBUS DP Ethernet/IP™ Allen-Bradley Remote I/O CC-link
Conveyor encoder	Up to 6 channels
Integrated PLC	AC500

Рисунок 2.3. Машинные интерфейсы [16].

Контроллер IRC5 имеет компьютер в стиле ПК, который обеспечивает более широкие возможности подключения и имеет гораздо большую мощность, чем его предшественники. Обычно контроллер поставляется с одной платой ввода / вывода, дающей 16 входов и 16 выходов. При необходимости плата может быть оснащена еще

многими дополнениями. Имеется аналоговый ввод / вывод. Контроллер также может работать как ПЛК, контролируя сигналы ввода / вывода. Фоновые программы (например, для сигналов мониторинга) можно запускать параллельно с реальной программой робота и даже после остановки программы робота. Выходы могут быть установлены в определенное время или расстояние до запрограммированной позиции и могут выполняться одновременно с движением робота. Контроллер также имеет встроенные двухцепные (0 В и + 24 В) цепи безопасности, что означает, что робот может работать без необходимости в дополнительных реле аварийной остановки. [17]

Работа такой станции не возможна без сварочного источника питания. На начальном этапе принято решение использовать уже имеющийся Сварочный аппарат - Fronius TPS-500i (рис. 2.4).



Рисунок 2.4. Сварочный аппарат Fronius TPS-500i [18].

Данный аппарат предназначен для полуавтоматической сварки плавящимся электродом в среде защитных газов (MIG/MAG); может работать в составе роботизированных комплексов. Управление сварочными параметрами осуществляется через сенсорный экран. При сварке алюминиевого ротора ток, согласно сварочной спецификации, достигает 250-255А. Это значит, что параметры сварочного аппарата позволяют работать без остановки 24 часа в сутки 7 дней в неделю [19].

Сварка дает много видимого белого дыма, почти полностью состоящего из оксида магния и оксида алюминия, которые известны как раздражители легких, поэтому станция должна быть оборудована системой вентиляции. Хорошо организованный отвод дыма исключает риск отравления. Для отвода сварочных газов применяется Циклонный фильтр ACF (рис. 2.5) [20].



Рисунок 2.5. Циклонный фильтр ACF [20].

Согласно WPS, максимальный ток может быть близко к 255А, что значит, что у нас есть для извлечения и очистки до 10 000 м³/ч.

2.4 Типовые решения

Главный аспект, который следует учитывать при расположении станции, это ограниченность производственной площади. Под проект может быть отведена

конкретная территория в цехе. Поэтому было принято решение, в котором станок с ЧПУ и робот будут интегрированы. Роботизированная станция частично будет использовать пространство внутри токарного станка и вокруг него. Максимальное внимание необходимо уделить безопасности. Все возможные подъезды и доступ в зону робота должны быть защищены надлежащим ограждением. Автором были созданы 3D модели токарного станка, ротора и некоторые элементы позиционера в среде Autodesk Inventor Professional. Концепции производственной линии были собраны для визуализации в программе RobotStudio.

Концепция 1

В начале процесса проектирования и согласования рассматривалась идея расположения сварочного робота непосредственно за токарным станком с ЧПУ, а роль блока вращения (позиционера) должны выполнять органы управления самого станка (рис. 2.6).

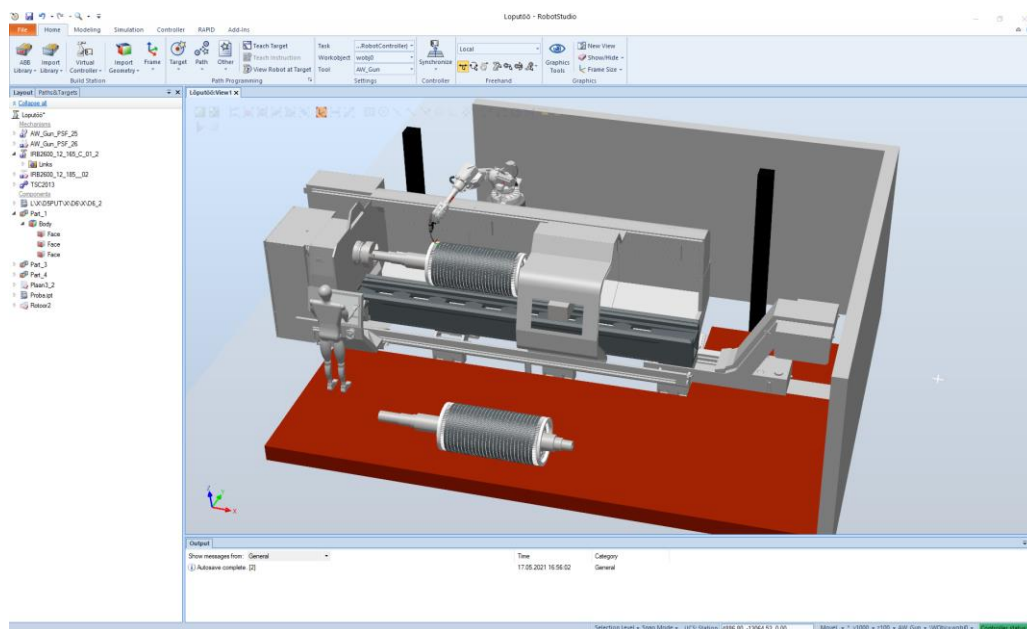


Рисунок 2.6. Концепция 1: Робот за токарным станком

Эта концепция подразумевала, что за одну установку ротора его можно точить и сваривать в одном месте. После рассмотрения данного варианта принято решение отказаться этой концепции по следующим причинам: большие электрические токи при сварке, проходящие через контакт качения, могут привести к повреждению подшипника шпинделя, что можно решить заменой на подшипник с термически напыляемым покрытием [21]. Основная же проблема заключалась в невозможности гарантировать на 100% защиту от сварочных брызг исполнительным механизмам

станка. Так же данная концепция требует не предусмотренной производителем модернизации самого токарного станка, что может повлиять на гарантийное обслуживание.

Концепция 2

Следующий предложенный вариант компоновки, при котором головка сварочного позиционера *HeadStock* (HS), расположенная в конце станка с ЧПУ, устанавливается на полу, задняя бабка *TailStock* (TS) установлена на салазках станка. Это необходимо потому, что роторы имеют разную длину, а расстояние между HS и TS необходимо регулировать, чтобы обрабатывать детали разной длины (рис.2.7).

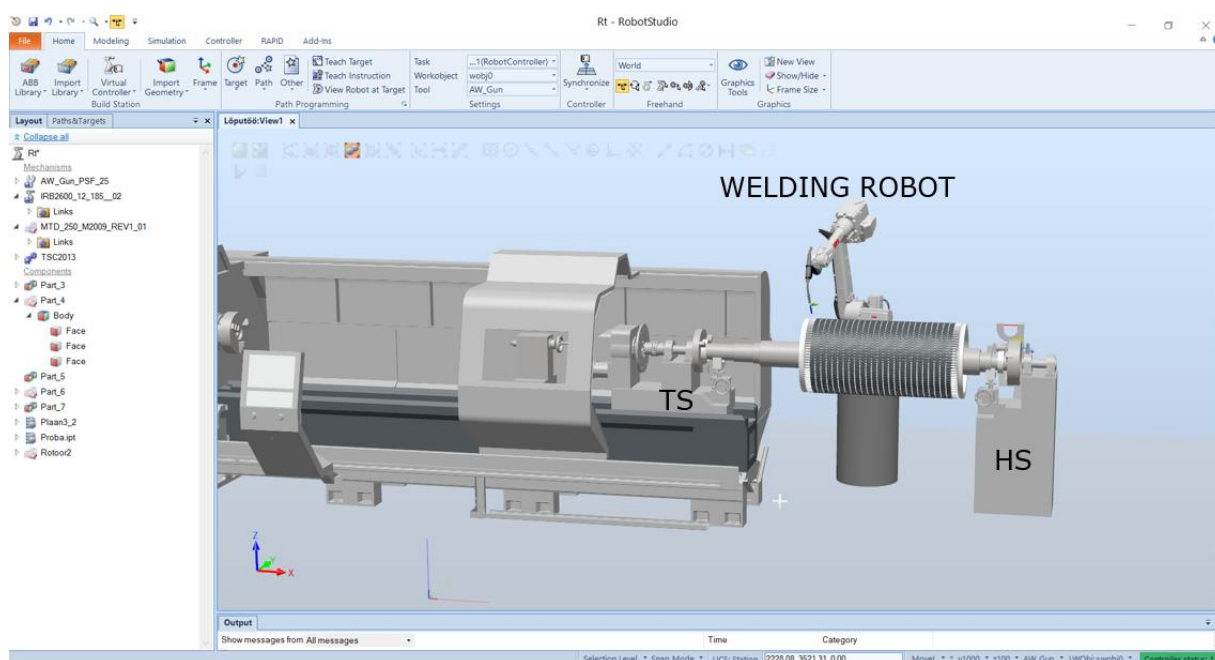


Рисунок 2.7. Концепция 2: установка позиционера на полу, задней бабки – на салазках станка. Такая конфигурация позволяет полностью интегрировать блок вращения (позиционер) [22] и контроллер робота ABB (рис. 2.8).

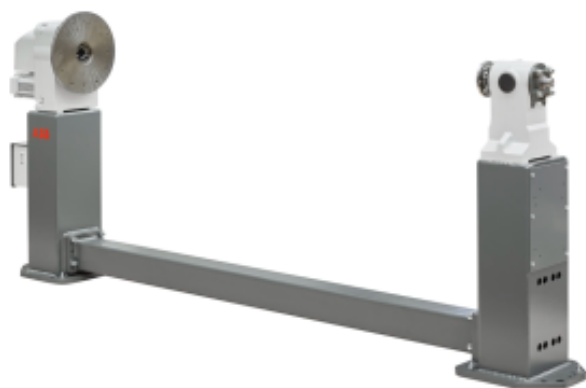


Рисунок 2.8. Позиционер [22].

В нынешней конфигурации станка с ЧПУ имеется достаточно большой конвейер для стружки с контейнером для отходов (рис.2.9). В такой конструкции используется пространство, необходимое для установки позиционера.



Рисунок 2.9. Конвейер для удаления стружки

Так же, как видно на фото, колонна крана ограничивает установку робота и делает невозможным реализацию первоначальной дизайнерской идеи.

Концепция 3

После консультаций с производителями станков с ЧПУ и дилерами стало понятно, что возможно установить винтовой конвейер, чтобы освободить место, необходимое для интеграции робота и позиционирования деталей (рис. 2.10).



Рисунок 2.10. Винтовой конвейер [23].

Винтовые конвейеры компактны, легко адаптируются к перегруженным местам и могут быть установлены горизонтально, вертикально и под наклоном [23].

Винтовой конвейер будет проходить сквозь стену, а сбор стружки будет организован за пределами здания (рис. 2.11).

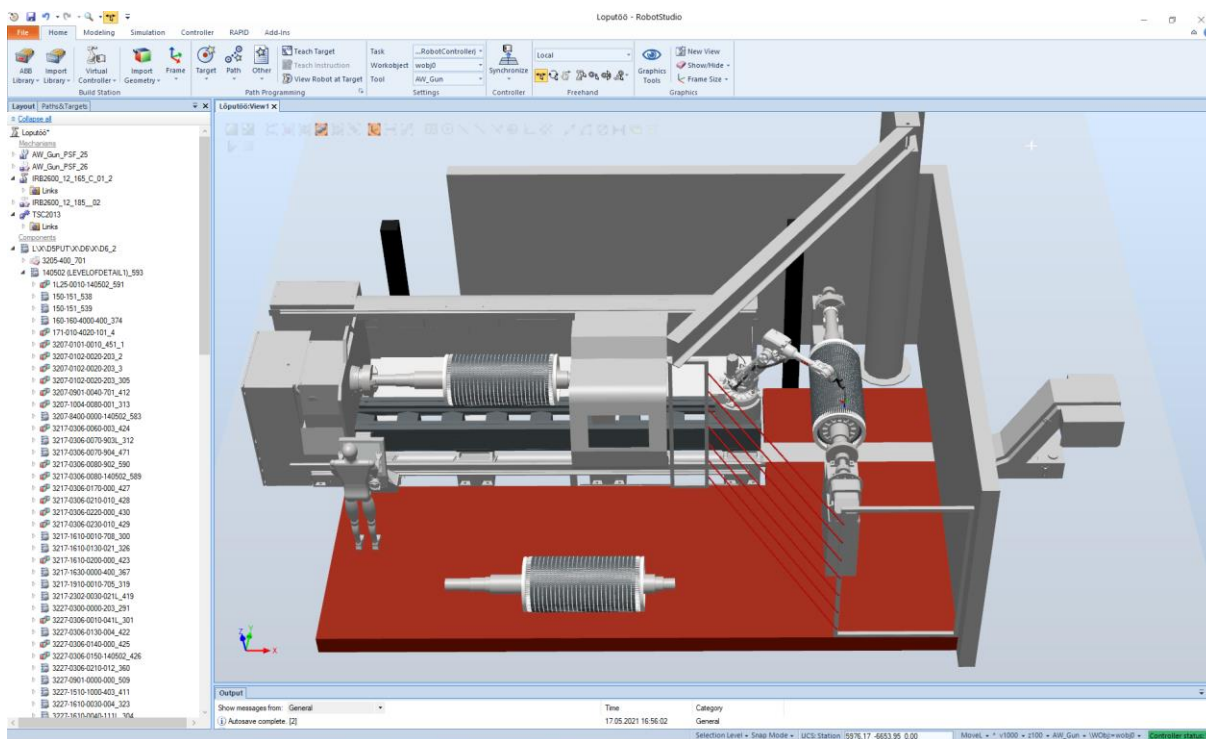


Рисунок 2.11. Концепция 3: Робот на раме станка, использование винтового конвейера

Над конвейерной линией будет спроектирована и установлена платформа, которая покрывает всю зону роботизированной станции, а также охватывает зоны предварительной сборки и входа оператора ЧПУ. Робот может быть установлен на раму станка с ЧПУ (положение робота станет неизменным) и напротив него - позиционер (TS и HS). Дополнительно необходимо установить консольный кран для погрузки и выгрузки роторов. Таким образом, данная производственная линия станет автономной, не будет зависеть от кранов, находящихся в цеху для общего использования.

3. ВЫБОР РЕШЕНИЯ И ВОЗМОЖНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для решения задачи было разработано три различных концепции расположения сварочного робота и токарного станка с ЧПУ. На основании анализа всех заявленных идей и выполнения требований по интеграции роботизированной станции с токарным станком с ЧПУ принято решение в пользу третьего варианта: установить робот на раму станка, а позиционер расположить напротив робота (рис. 3.1).

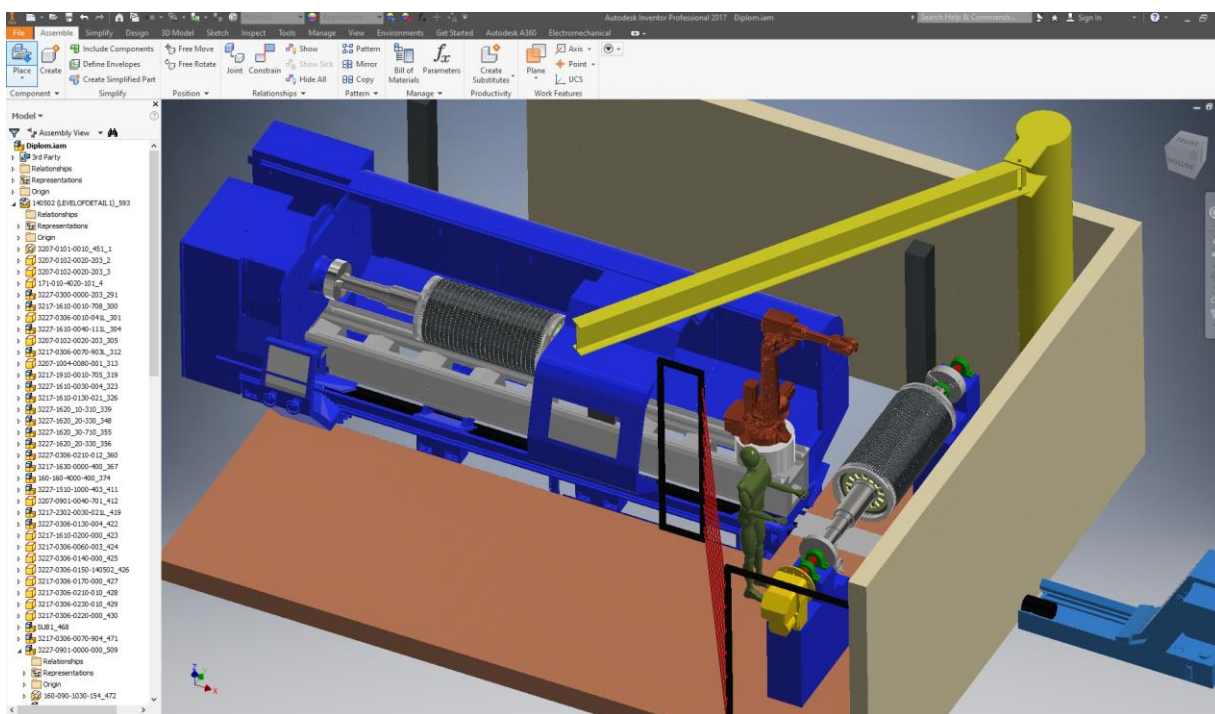


Рисунок 3.1. Окончательная концепция: установка робота на раму станка, позиционер – напротив робота

Установка робота на раме токарного станка позволяет использовать нерабочую его часть. При таком расположении робота исполнительные механизмы станка не подвергаются попаданию сварочных брызг. Позиционер будет находиться напротив робота, где колонна крана не ограничивает его установку. Для отвода отходов с токарного станка используется винтовой конвейер, проходящий за стену. Контейнер для сбора стружки будет находиться вне рабочей зоны за стеной здания.

Поверх винтового конвейера будет построена единая общая платформа, которая обеспечит оператору одну ровную рабочую поверхность без каких-либо препятствий или ступенек на полу. Платформа будет иметь сегментную модульную конструкцию, обеспечивающую легкий доступ во время процедур очистки и обслуживания. Такая конструкция делает зону намного безопаснее, так как оператор может столкнуться с

любым препятствием на поверхности пола. Конвейер и кабельные каналы будут установлены под этой платформой. Платформа будет иметь подъемные секции для обслуживания и ремонта.

Максимальное внимание необходимо уделять безопасности. Все возможные входы и доступ в зону роботов должны быть защищены надлежащим ограждением. Каждая входная дверь или ворота должны быть оборудованы датчиками запираания дверей и надлежащим замком. В качестве блока мониторинга будет использоваться контроллер безопасности или плата безопасности внутри контроллера робота.

Все используемое оборудование должно соответствовать предписаниям и правилам ISO 13857 [24] и ISO 12100 [25].

Такая концепция обеспечивает функционирование станции, которая может полностью соответствовать текущим техническим требованиям и быть расширена в будущем.

Алгоритм работы будущей системы

На первом этапе ротор ставят на токарный станок. Торцы стержней должны быть одинаковой длины с обеих сторон, соответственно, их выравнивают путем механической обработки (торцовка). Далее ротор при помощи консольного крана переставляют на позиционер, предварительно закрепив на торцах стержней кольца короткого замыкания. После установки запускается сварочная станция, которая по расчетным данным полностью сваривает стержни с кольцами за 6 часов. За это время можно подготовить к сварке следующий ротор. Подготовка проходит на этом же токарном станке (торцовка). По окончании сварочного процесса ротор снимают со сварочной станции и устанавливают на токарный станок с ЧПУ для удаления лишних сварочных швов и наплывов. В то же время можно установить на сварочную станцию заранее подготовленный следующий ротор и начать процесс сварки. Таким образом, при высоких производственных нагрузках данная станция может работать непрерывно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы является разработка проекта по созданию линии производства алюминиевых короткозамкнутых роторов на заводе АВВ. Данный вид роторов никогда не производился на эстонском заводе. Для разработки проекта необходимо было решить использовать ли труд человека или приобрести роботизированную сварочную станцию. Проведенный экономический анализ показал, что использование робота целесообразнее, а инвестиции в покупку робота оправданы и окупятся уже через 2,3 года.

Учитывая ограниченность в свободных производственных площадях, было принято решение, что необходимо интегрировать сварочного робота с токарным станком с ЧПУ. Для решения этой задачи было выбрано оборудование и разработано три концепции по интеграции. Первый вариант предполагает расположение сварочного робота за токарным станком, а роль блока вращения (позиционера) должны выполнять органы управления самого станка. По второй концепции позиционер устанавливается на полу, а задняя бабка – на салазках станка. В третьем варианте решения робот устанавливается на раму станка, позиционер находится напротив робота на полу. В результате анализа предложенных вариантов выбор был сделан в пользу третьей концепции. Это решение позволяет интегрировать сварочную станцию с токарным станком с ЧПУ, учитывая особенности отведенной под проект производственной площади. Кроме того, эта концепция может быть расширена в будущем.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks on välja töötada alumiinium lühisrootorite tootmisahel ABB Mootorite ja Generaatorite tehases. Sellist tüüpi rootoreid pole eesti tehases kunagi valmistatud. Projekti realiseerimiseks on möödapääsmatu otsustada tööjõu ressursi tüüp: kasutada inimtööjõudu või robot-keevitusjaama. Läbi viidud majandusanalüüs näitas, et mõttekam on kasutada roboti tööjõudu ning tehtud investeeringute tasuvusaeg on 2,3 aastat.

Tootmispinna nappuse tõttu ilmnes, et hädavajalik on integreerida keevitusrobot CNC funktsionaalsusega treipingiga. Selleks sai koostatud kolm eri integratsiooni kontseptsiooni ning valitud vastavad seadmed.

Esimene variant näeb ette keevitusroboti asetuse treipingi taha kusjuures keevitus positsioneer funktsiooni täidavad treipingi osised. Teise kontseptsiooni järgi asetatakse keevitus positsioneer põrandale ning selle tagumine osa treipingi raamile.

Kolmanda variandina nähakse ette keevitusroboti paigutamine treipingi raamile ning positsioneer paigaldus selle ette põrandale.

Läbiviidud analüüsi tulemusena võib sobivaimaks pidada kolmandat varianti. See võimaldab seadmed omavahel integreerida, mahutada etteantud pinnale ning tulevikus tööala laiendada.

SUMMARY

The purpose of this work is to develop a project to create a line for the production of aluminium squirrel-cage rotors at the ABB plant. This type of rotors has never been produced in an Estonian plant. To develop the project, it was necessary to decide whether to use human labour or purchase a robotic welding station. The conducted economic analysis showed that the use of the robot is more efficient, and the investment in the purchase of the robot is justified and will pay off in 2,3 years.

Due the limited space, it was decided that it was necessary to integrate the welding robot with a CNC lathe. To solve this problem, equipment was selected, and three integration concepts were developed. The first option assumes the location of the welding robot behind the lathe, and the controls of the machine itself should play the role of the rotation unit (positioner). In the second concept, the positioner is mounted on the floor and the tailstock is mounted on the machine slide. In the third variant of the solution, the robot is installed on the CNC machine frame; the positioner is located opposite the robot on the floor. As a result of the analysis of the proposed options, the choice was made in favour of the third concept. This solution allows you to integrate the welding station with a CNC lathe, taking into account the specifics of the production area allocated for the project. Moreover, this concept can be expanded in the future.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Асинхронный электродвигатель. Устройство и принцип действия. [Online] <http://motors33.ru/asinxronnyj-elektrodvigatel-ustrojstvo-i-princip-dejstviya.html> (15.05.21).
2. Большая российская энциклопедия, [Online] https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/3516728 (15.05.21).
3. Асинхронный двигатель - принцип работы и устройство, [Online] <https://electroandi.ru/elektricheskie-mashiny/asdvig/asinkhronnyj-dvigatel-printsip-raboty-i-ustrojstvo.html> (16.05.21).
4. Как устроен ротор электродвигателя, [Online] https://konstruktor74.ru/index.php?route=information/information&information_id=68 (15.05.21).
5. Фазный ротор электродвигателя, [Online] <https://www.ttaars.ru/about/stati/faznyy-rotor-elektrodvigatelya/> (15.05.21).
6. Беспалов, А.В. Проектирование асинхронного двигателя общего назначения с короткозамкнутым ротором, 2012, [Online] <https://nvsu.ru/ru/Intellekt/1134/Bespalov%20A.V.%20Proektirovanie%20asinhronnogo%20dvigatelya%20-%20Uch%20posobie%20-%202012.pdf> (04.05.21).
7. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Qualification based on pre-production welding test, ISO 15613:2004, [Online] <https://www.iso.org/standard/28394.html> (15.05.21).
8. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test — Part 2: Arc welding of aluminium and its alloys, ISO 15614-2:2005, [Online] <https://www.iso.org/standard/28408.html> (15.05.21).
9. Traditsioonilise töökeevitamise ja keevitusroboti keevituskulude võrdlus, [Online] <http://m.ee.jhyrobotic-es.com/news/cost-comparison-of-traditional-labor-and-weldi-33918957.html> (15.05.21).
10. GuruFocus, [Online] <https://www.gurufocus.com/term/wacc/NYSE:ABB/WACC-/ABB> (15.05.21).
11. Анализ состояния предприятия, [Online] https://afdanalyse.ru/publ/finansovyj_analiz/1/wacc/15-1-0-72 (15.05.21).
12. Показатели эффективности инвестиционного проекта (инвестиций), [Online] <http://mathhelpplanet.com/static.php?p=pokazateli-effektivnosti-investitsionnogo-proekta> (15.05.21).

13. Расчет доходности инвестиционного проекта, [Online] <https://dengikupera.ru/investicyi/raschet-dohodnosti-proekta/> (15.05.21).
14. Внутренняя норма доходности, [Online] https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BD%D1%83%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%D1%8F_%D0%BD%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0_%D0%B4%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8 (15.05.21).
15. IRB 2600 Industrial Robot, [Online] <https://www.irsrobotics.com/wp-content/uploads/2017/11/Data-sheet-IRB2600-IRC5.pdf> (15.05.21).
16. RC5 Industrial Robot Controller, [Online] https://library.e.abb.com/public/c13e1c5490c61230c125796000515137/IRC5%20datasheet%20PR10258%20EN_R13.pdf (06.05.21).
17. Каталог промышленных роботов, [Online] https://www.robot96.ru/catalog/promyshlennye-roboty/roboty_abb/abb-irb-6400-3-0-75/ (06.05.21).
18. СВАРОЧНЫЙ ИСТОЧНИК TPS 500I, [Online] <https://www.svarka.kz/collection/katalog-a4c16d/product/tps-500i-tps-500i-pulse> (15.05.21).
19. Руководство по эксплуатации, Источник тока MIG/MAG, TPS 320i / 400i / 500i, [Online] http://www.spetselektroodi.ee/wp-content/uploads/2017/07/TPSi_manual_ru.pdf (06.05.21).
20. Cyclone filter ACF, [Online] https://vaagram.dk/en/produkt/Cyclonefilter_ACF.html (15.05.21).
21. Защита от воздействия электрического тока, [Online] <https://evolution.skf.com/ru/%D0%B7%D0%B0%D1%89%D0%B8%D1%82%D0%B0-%D0%BE%D1%82-%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B8%D1%8F-%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%B0> (15.05.21).
22. IRBP L Positioner, [Online] <https://new.abb.com/products/robotics/application-equipment-and-accessories/workpiece-positioners/irbp-l> (15.05.21).
23. Винтовой конвейер, [Online] <https://www.directindustry.com.ru/prod/syntron-material-handling/product-32626-366318.html> (15.05.21).

24. Safety of machinery — Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs, ISO 13857:2019, [*Online*] <https://docs.cntd.ru/document/1200103647> (15.05.21).
25. Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction, ISO 12100:2010, [*Online*] <https://www.iso.org/standard/51528.html> (15.05.21).