

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Технологија прераде пластичних маса

Број индекса: 2020/2017

Ненад М. Зоричић

**Роботизована постројења за бојење
пластичних компонената у
аутомобилској индустрији**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру мастер рада потребно је да кандидат изврши прикупљање и систематизацију проблема наношења боје на делове од пластичних маса у аутомобилској индустрији. Потребно је описати појам колориметрије, односно начин дефинисања и мерења боје. У другом делу рада описати роботизовано постројење у предузећу ФЦА Србија које се бави наношењем боје на пластичне компоненте, начин контроле боје и дати пример решавања могућег проблема.

Препоручена литература:

1. Богдан Недић, Наташа Весић, Дарко Васиљевић, Боја, колориметрија и пластичне масе, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
2. Радојковић-Величковић М., Мијин Д., Органске боје и пигменти, Универзитет у Београду, Технолошко-Металуршки факултет у Београду, Београд, 2001.
3. Весић Н., Недић Б., Colorimetric characteristics of the light equipment in the automobile-industry, Vth International Conference on Tribology, University of Kragujevac, Mechanical Engineering Faculty Kragujevac, Kragujevac, 2005.

У Крагујевцу,

септембар, 2018.

Проф. др Богдан Недић

Садржај

1. УВОД.....	5
2. БОЈЕ И ПИГМЕНТИ.....	6
2.1. Карактеристике боје.....	6
2.2. Представници органских пигмената.....	7
2.3. Представници неорганских пигмената.....	10
2.4. Пигменти посебне намене	11
2.5. Главне растворљиве боје	12
3. КОЛОРИМЕТРИЈА.....	13
3.1. Природа светлости	13
3.2. Физиолошка осетљивост	13
3.3. Појам колориметрије.....	14
3.4. Трихроматска особина вида	15
3.5. Сабирање светлосног флуksа	17
3.6. Колориметријске јединице	19
3.7. Просторна представа боја.....	24
3.8. Трансформација координата	29
3.9. Стандардни CIE систем	36
3.10. Дијаграми боја са равномерном размером.....	42
3.11. CIELAB систем.....	47
4. ПРОИЗВОДЊА И БОЈЕЊЕ ПЛАСТИЧНИХ КОМПОНЕНАТА У АУТОМОБИЛСКОЈ ИНДУСТРИЈИ.....	49
4.1. Опрема за бризгање.....	50
4.2. Процес монтаже.....	51
4.3. Процес бојења пластичних компонената	52
4.4. Припрема компонената прањем и одмашћивањем	54
4.5. Сушење компонената издувавањем и загревањем	55
4.6. Роботизовано пламеновање	57
4.7. Роботизовано бојење.....	58
4.8. Контрола колориметрије.....	69
4.9. Проблеми и грешке при процесу бојења.....	74
5. ПРИМЕР: ПРОБЛЕМ КОЛОРИМЕТРИЈЕ 639 БРОНЗАНЕ МЕТАЛИК БОЈЕ	84
6. ЗАКЉУЧАК.....	92
7. ЛИТЕРАТУРА.....	94

Резиме: Кроз овај рад приказани су процеси производње обојених пластичних компонената у савременој аутомобилској индустрији. Приказане су неке од основних карактеристика боја и пигмената који се користе у циљу постизања све сложенијих естетских захтева када су пластичне компоненте у питању. Наводе се основни појмови у колориметрији, као и еволуција система за представу боја. У раду је описано једно модерно, потпуно аутоматизовано, роботизовано постројење за бојење пластичних компонената. Приказани су сви параметри који су кључни за овакву врсту технолошког процеса. Дат је пример успешно решеног проблема незадовољавајућих резултата колориметријског мерења металик боје променом параметара роботизованог бојења и додавањем одређеног пигмента боји.

Кључне речи: пластичне компоненте, аутомобилска индустрија, бојење, технолошки параметри, роботизација, аутоматизација, колориметрија.

Abstract: This paper presents the processes of producing painted plastic components in the modern automotive industry. Some of the basic characteristics of colors and pigments are presented which are used to achieve more and more complicated aesthetic requirements when plastic components comes to matter. The basic terms in colorimetry are given, as well as the evolution of the color representation system. This paper describes a modern, fully automated, robotized plant for the painting of plastic components. All parameters that are key to this kind of technological process are shown. An example of the successfully solved problem of unsatisfactory results of the colorimetric metallic color measurement by changing the painting parameters and adding the pigment to color is given.

Keywords: plastic components, automotive industry, painting, technology parameters, robotization, automatization, colorimetry.

1. УВОД

Боје су свуда око нас. Оне испуњавају видљиви свет живих бића, утичу на емоционално стање човека, изражавају осећања. Готово је немогуће замислити било коју грану индустрије без присуства дискусије о дизајну и боји производа. Ово се нарочито односи на аутомобилску индустрију где су аутомобили постали не само човекова потреба за брзим и безбедним транспортом, него и начин да се изрази смисао за уметничко стваралаштво. Да би се привукла пажња купаца, произвођачи улажу огроман новац не само у дизајн, већ и у развој нових палета боја, али и опрему и постројења за бојење.

Атмосфера у погонима за бојење засићена је испарењима од материјала за бојење, а ти материјали су врло често штетни за људско здравље. Зато је бојење један од процеса који спадају у ону групу где је човека пожељно изузети из процеса. Поред хуманизације рада, употребом савремених постројења постижу се и друге погодности, као што су повећање продуктивности и квалитета финалног производа.

У овом раду описано је постројење за бојење пластичних компонената, које је у потпуности аутоматизовано и роботизовано, опремљено са шест робота, системима за аутоматизован транспорт носача компонената, системима за складиштење и дистрибуцију боје, системима за одржавање параметара атмосфере бојења, температуре и влажности. У другој целини, дате су основне карактеристике боја и пигмената које се од појаве потребе за бојењем користе у најразличитије сврхе.

У следећој целини рада објашњена је природа светлости, појам колориметрије и колориметријске јединице. Приказани су и системи за представу боја, од просторне представе, стандардног CIE система па до CIELAB система.

У четвртој целини описани су основни процеси за производњу пластичних компонената у аутомобилској индустрији, опрема за брызгање, бојење и монтажу. Нагласак је на постројењу и опреми за бојење где је дат комплетан процес, опрема и сви кључни параметри једног савременог, аутоматизованог и роботизованог постројења. У овој целини су представљени и процеси контроле и мерења кључних карактеристика обојене компоненте, као и проблеми и грешке које се могу појавити у процесу бојења.

Петом целином је обухваћена идентификација проблема лоших резултата колориметријских мерења металик бронзане боје након сужења толерантног подручја од стране произвођача аутомобила. Приказано је решење проблема лоших резултата мерења, које се базира на промени параметара апликације бојења на два робота у делу путање која покрива критичну зону, као и на корекцији боје додавањем одређеног пигмента.

У последњој целини су дати закључци на ову тему, након чега следи приказ коришћене литературе.

2. БОЈЕ И ПИГМЕНТИ

У пољу бојења пластике, постоје две главне категорије, боје и пигменти [2].

Боје и пигменти су обојене супстанце које се карактеришу способношћу да апсорбују видљиву светлост (380-780 nm). Светлост може бити апсорбована у целини, делимично или уопште да се не апсорбује од стране гасова, течности или чврстих једињења. Део који се не апсорбује може да се одбије од површине течности или чврстих једињења или проћи кроз гасове, течности или сјајна чврста једињења. Светлост која се емитује из извора светлости, као и рефлектована или пропуштена светлост, долази до ока и као резултат различитих процеса у оку и између ока и мозга долази до доживљаја обојености.

Пигменти су нерастворне, обојене материје, углавном минералног порекла, које се употребљавају од давнина за бојење метала, дрвета, камена, гипса и других материјала. То су обично били оксиди гвожђа, хрома, олова и други неоргански материјали, који су имали добру постојаност на дејство светлости, али су се различито понашали према другим агенсима из атмосфере.

Разлика између боја и пигмената се у основи састоји у томе што су боје материје које су или растворљиве у води или се преводе у растворљиве материје простим хемијским поступцима (на пример, редукцијом са натријум-сулфидом или хидро-сулфидом), а затим се поново процесом оксидације преводе у нерастворљиве супстанце, док су пигменти трајно нерастворљиви у води и употребљавају се за бојење у дисперзијама или у присуству везивног средства.

2.1. Карактеристике боје

Визуелни осећај који настаје падом упадног флукса на мрежњачу ока, има три својства [1]:

- тон боје,
- засићеност (интензитет боје) и
- сјајност.

Боје се могу сврстати у две главне категорије: пигменти и растворљиве боје [2].

Прва категорија обухвата пигменте, који се деле на органске и на неорганске. Органски пигменти су мешавина угљеника, водоника, кисеоника, азота и сумпора. Хемијска анализа многих органских пигмената открива присуство неколико поменутих метала који су представљени у хемији органских пигмената, као додаци пигмената површине. Неоргански пигменти чине мешавину металних и металоидних елемената са кисеоником, сумпором и селеном [1].

Другу велику групу боја чине растворљиве боје.

Забележено је око четрдесет различитих обојених супстанци (боја и пигмената) у индустрији полимера. Органске обојене супстанце се могу класификовати на више начина, на пример, према хемијском саставу, према начину употребе или према начину ослобађања апсорбоване енергије.

Према хемијском саставу обојене супстанце се деле према индексу боје (Colour Index, CI) на нитрозо, нитро, азо, стилбенске, дифенилметинске, триарилметинске, ксантенске, акридинске, хиолинске, метинске, азинске, оксазинске, сумпорне, индигоидне, фталоцијанинске, природне итд.

Према начину употребе обојене супстанце се деле према CI на киселе боје, базне боје, дисперзне боје, реактивне боје, пигменте, сумпорне боје, редуccionе боје итд.

Већина тзв. полимер растворљивих боја које се користе на тржишту, настаје из само девет већих хемијских група. То су антрапиронинске, антрахинонске, азо, нигросине, пиронинске, пиразолонске, хиолинске, фталеинске и ксантенске.

2.2. Представници органских пигмената

Органским пигментима називају се у води нерастворне обојене супстанце које не садрже сулфо и карбокси групу. Обојене супстанце које су нерастворне у води али се растварају у уљима и мастима, називају се уљане боје. Обојене супстанце које су нерастворне у води, а представљају соли калцијума и баријума служе за добијање лакова. Међу органским пигментима ове обојене супстанце су најраспрострањеније и оне су по структури најчешће киселе азо боје.

Органски пигменти могу да се употребе у смеси са необојеним минералним материјалима, које се називају пуниоци. Пуниоци су најчешће алуминијум(III)-оксид и баријум-сулфат.

Пигментима на бази азо једињења када имају хлор или нитро групу у свом саставу, смањује се растворљивост у органским растварачима, а повећава прозирност.

Редуccionе боје су у свом основном облику нерастворне и представљају пигменте уколико се исталоже, на пример, у облику баријумових соли сулфонских киселина на материјалу. Пигменти се преводе у боју увођењем сулфонских група, тако да су у органске боје укључени и органски пигменти. На тај начин, хемија боја укључује и органске пигменте [1].

Пигменти се, према структури, деле на [2]:

- лакове (катјонског и ањонског типа),
- пигменте на бази металних комплекса и
- неутралне пигменте (који не садрже метал у структури).

Према структури органског остатка који улази у састав пигмената, пигменти се деле на:

- азо пигменте,
- антрахинонске пигменте,
- индигоидне пигменте,
- фталоцијанине,
- хинакридонске пигменте,
- перинонске и периленске пигменте и
- остале пигменте.

Азо пигменти. Азо пигменти представљају највећу групу пигмената, како по броју различитих структура, тако и по производњи. Доминирају у жутим, наранџастим, црвеним и љубичастим нијансама.

Ханза жута. Ханза жуте боје су непрозрачне у поређењу са другим породицама органских жутих боја. Ханза жуте су познате као потенцијално значајни растварачи, што ограничава њихову употребу у пољу термопластике.

Никл-Азот жута. Никл-Азот жута је један од најстаријих доступних, органских, жутих пигмената. Коришћен је у комбинацији са целулозом, полиолефинима и PVC -ом. Међутим, ова жута, са зеленом нијансом, је замењена у већини случајева, другим, стабилнијим и ефикаснијим органским жутим бојама. Никл-Азот жути пигмент има већи историјски значај него практичну индустријску употребу.

Бензимидазолоне жута, наранџаста и црвена. Ове жуте, наранџасте и црвене боје се сматрају пигментима високих перформанси. Жуте теже да добију зелену нијансу, наранџасте теже да постану наранџасте са жутом нијансом, а црвене су црвене са плавом нијансом.

Isoindolinone и Isoindoline жута, наранџаста и црвена. Ови пигменти варирају од жутих са зеленом нијансом до жутих са црвеном нијансом. Поседују изузетне карактеристике загревања, светлости и растворљивости.

Ват жута и наранџаста. Ова хемијска група показује добре перформансе приликом бојења пластике. Ват пигменти су отпорни на растварање, загревање, светлост и временске услове. Наведени, изузетно скупи пигменти, имају велику употребу у превлакама, где пружају светлије, јасније боје у поређењу са пластичним системима.

Flavanthrone жута. Жута боја, високих перформанси са црвеном нијансом, се обично користи у превлакама. Иако пружа исте перформансе и у пластици, пре свега где постоје захтеви за високом издржљивошћу, флавантрон жута има малу употребу.

Disazo кондензациона жута и црвена. Дисазо кондензациони пигменти пружају значајна побољшања у перформансама у односу на традиционалне азо типове. Пигменти у овој породици варирају од жутих са зеленом до црвене нијансе, па до црвених са жутом до плаве нијансе, и до љубичастих, па чак и браон са црвеном нијансом. Ови пигменти имају широку примену у производњи штампарских боја, као и за бојење гумене масе.

Hinakridon црвена и љубичаста. Ова породица пигмената варира од црвене са благом жутом нијансом до црвене са плавом нијансом и све до љубичасте. Ова фамилија боја има потенцијала при решавању проблема растварања стирена. Наведени пигменти имају изузетне резултате код система наношења превлака, нарочито код завршних аутомобилских фарбања, што доводи до њихове широке употребе у пластици.

Индигоидна црвена и љубичаста. Ови пигменти у једном ограниченом пољу пластике пружају јединствене нијансе од тамно црвених до љубичастих. Генерално, ова група пигмената има изузетне карактеристике. Ипак ови пигменти су ограничени донекле у својој употреби. Иако је отпорност на растворљивост одлична, они су ипак растворљиви у неким полимерима, као што је полиестер.

Diketo-Pyrrolo-Pyrrol црвена и наранџаста. Ову групу пигмената одликује изузетна отпорност на топлоту, растворљивост и временске услове. Изузетно је популаран на тржишту аутомобилског екстеријера у системима наношења превлака и у домену пластичних маса.

Dianisidine наранџаста. Спадају у типичну класу наранџастих пигмената. Dianisidine наранџаста је наранџаста са жутом нијансом, која се превасходно користи у индустрији мастила. Отпорност коју показује на топлоту, растворљивост и светлост, оправдава њену употребу и у домену пластике.

Dinitraline наранџаста. Још једна наранџаста боја са ограниченом употребом, из групе класичних органских пигмената. Наранџасту са жуто-црвеном нијансом одликује ниска цена, али и скромне карактеристике, те се најпре користи при наношењу превлака и за мастила за штампање.

Нафтол Црвена. Ова фамилија црвених боја је најраспрострањенија. Нијансе варирају од жутих до плаво-црвених, па чак и до браон са црвеном нијансом. Карактеристике ове групе се протежу од јако слабих до високих перформанси.

Црвена лака Ц. Овај пигмент тежи да постане топла црвена или црвена са жутом нијансом. Као и многе друге црвене, и она има употребу као мастило. Важан фактор представља релативно добра стабилност приликом загревања, непрозрачност и отпорност на растварање.

Трајно црвена 2Б. У овој класичној групи, трајна црвена 2Б, је најчешће коришћена боја. Она варира од жуте до плаве у нијансама. Ови типови пигмената имају врло малу сврху у пластици, због метала који негативно утичу на физичке карактеристике многих пластичних маса.

Пурпурни пигмент. Овај класични органски пигмент је успешно коришћен годинама. Црвена са плавом нијансом, запажена по доброј стабилности на топлоту, има примену у PVC -у због њеног отпора према растварању у овој фамилији полимера.

Alizarine кестењасте боје. Црвена са плавом нијансом која практично прелази у љубичасти спектар. Осредња стабилност на топлоту заједно са отпором на растворљивост подржава овај пигмент годинама за бојење памука, са не превеликим захтевима.

Indantren плава. Ова група пигмената има црвену боју са тако јаком плавом нијансом да се врло лако може назвати шљива плава или тамно плава. Наведена група показује добру стабилност на топлоту и отпорност на растворљивост.

Karbazol dioksazin љубичаста. Ово је пигмент високих перформанси и представља праву љубичасту боју. Као изузетно јак пигмент има изванредну стабилност на топлоту, светлост и отпоран је на растворљивост. Међутим, јако је тешко распршити овај пигмент и одржати га тако у већини система.

Фталоцијанин плава. Ове плаве варирају од плавих са веома црвеним нијансама до плавих са веома зеленим нијансама. Стабилност варира у овом рангу боја такође и због различитих кристалних структура. Као група боја, фтало плаве могу бити најпопуларнија и највише коришћена хроматска боја. Употребљавају се за бојење гуме,

коже, тканина, за бојење пластике, као и за лакове и боје у графици. Ови пигменти имају изузетну отпорност на топлоту, светлост, и на растворљивост.

Фталоцијанин зелена. Ови зелени пигменти уживају исту популарност као и фтало плави. Нијансе варирају од зелених са плавим нијансама до бромираних зелених са израженим жутим нијансама.

2.3. Представници неорганских пигмената

Угљеник црна. Угљеник црна је један од најстабилнијих пигмената у употреби данас. Он је литерарно говорећи "свуда присутан" у пластичним производима. Веома је стабилан и има широку употребу. То је пигмент који се најчешће користи за производњу сивих боја. Веома значајна употреба која се не тиче боја, је да обезбеди ултраљубичасту светлосну заштиту у већем броју примена везаних за временске прилике.

Титанијум Диоксид. То је пигмент који се до сада користио за производњу белих и пастелних мастила, као и прозирних пластичних производа. У пластици, најкоришћенији материјал је црвенкасто-браон кристал, титанијум диоксид. Стабилност на топлоту, брзина светлости, стабилност у зависности од одређених временских услова, отпорност на растворљивост, хемијска отпорност ових пигмената је одлична.

Гвожђе оксид жута, жуто-мрка, црвена и црна. Овај хемијски тип производи помало тамне боје по ниској цени. Гвожђе оксид има своју употребу тамо где су захтеви за стабилношћу на топлоти у најбољем случају скромни. Ови пигменти се обично користе у фарбама, уметничким бојама, и превлакама.

Хром оксид зелена. Овај пигмент је јединствен по томе што је изузетно стабилан на топлоти и на различитим временским условима, поседује хемијску отпорност и отпорност на растварање иако има помало тамну боју. Хром оксид зелена је зелени пигмент који се користи за конструкцију спољашњих пластичних апликација.

Олово хромат жута, хром наранџаста, и олово молибден наранџаста. Ове црвене боје са зеленим нијансама, помешаним са наранџастим представљале су главни правац годинама у примени у пластици. Међутим, њихова употреба данас, а и у будућности постаје ограничена због утицаја средине и токсиколошког утицаја олова и хрома. Ови пигменти показују интензивне, јасне и прозирне боје.

Кадмијум жута, наранџаста, црвена, и мрко жута. Кадмијум пигменти су веома важни пигменти, упркос токсиколошким и условима средине, због присуства кадмијума и селена у њиховим структурама. Кадмијум пигменти су запажени због тога што дају интензивне, јасне, прозирне и лако распршиве боје.

Жива кадмијум наранџаста, црвена и мрко жута. Ови кадмијум пигменти су по нијанси слични са обичним кадмијум пигментима, осим селена, који је у обичном кадмијуму замењен живом. Присуство живе у овим пигментима их је практично повукло са тржишта, због токсиколошких забрана и услова средине.

Ултрамарин плава, љубичаста и ружичаста. Ултрамарин пигменти су запажени по њиховим пуним бојама, осредњом стабилношћу на топлоти, хемијског отпора, отпора на растварање, прозрачности, отпорности на различитим временским условима, и атрактивне цене.

Гвожђе плава. То су плави пигменти са тамно зеленом нијансом. Гвожђе плаве су хемијски *ferri-ferro-cyanide*. Основна примена у пластици проузрокована је релативно ниским трошковима, и осредњим захтевима у преради пластичних маса.

Сложени неоргански пигменти. Ова група јако стабилних пигмената има порекло у керамичкој обојеној индустрији. Ови пигменти показују изузетну стабилност на топлоти, хемијску отпорност, отпорност на растворљивост, прозрачност и отпорност на различитим временским условима. Ово су засигурно најопштији и најстабилнији пигменти који се данас могу наћи. Боје нису ни близу тако интензивне као код других хемијских типова на тржишту боја.

Цинк сулфиди и цинк оксиди. Оба материјала су беле боје али се не приближавају титанијум диоксиду у употреби као обојени пигмент или као прозрачни пигмент у пластици. Са друге стране, у односу на титанијум диоксид одликују их добре физичке карактеристике. Оба ова пигмента имају моћ белјења на много нижим нивоима трења него што је то случај са титанијум диоксидом. Цинк оксид, на пример, не доноси само белину гуменим производима, већ има улогу убрзавања процеса вулканизације [1].

2.4. Пигменти посебне намене

Метални пигменти. Ови пигменти представљају металне честице различитих величина, направљених од алуминијума, бакра, цинка и њихових легура. Честице алуминијума дају сребрне металик боје, док бакар, цинк и легуре алуминијума дају златне, бакарне, месингане и бронзане боје. Ефекат метала је промењен не само по облику и величини већ и по расподели истих у датом производу. Пошто алуминијум, као фини суви прах може створити експлозивну мешавину са ваздухом, већи део овог материјала је доступан на тржишту у облику пасти или као течни концентрат. Површински третмани ових материјала побољшавају њихов изглед и учинак. Честице других метала као што је нерђајући челик, користе се у сврху заштите површине, као што је отпорност на корозију и електрична проводљивост [1].

Искра пигменти. Ови пигменти варирају у боји, облику и величини. Облици и боје су једино ограничени маштом дизајнера и могућношћу да се пигменти пласирају у производе а да се при том задрже првобитне физичке карактеристике и облик

Интерференциони/бисерни пигменти. Ова група обухвата пигменте који пружају бисерну, шарену површину. Крајњи производ има јединствен изглед као резултат различитих боја пигмента у зависности од светлости и степена видљивости.

Светлосни пигменти. Ова група пигмената покрива велики број технологија и већи део тржишта, почев од ТВ технике до играчака које сијају у мраку. За примену у пластици, главни пигменти су флуоресцентни и фосфоресцентни типови пигмената.

2.5. Главне растворљиве боје

У циљу да се уклоне метали из адитива пластичних производа, примена боје у пластици добија све више на значају. Породице органских и неорганских пигмената теже да покрију подручја одређене боје и да имају сличне карактеристике. Пример за органску породицу је кинакридонска породица пигмената која је генерално наранџасто-црвена, црвена и магента. Што се тиче неорганске кадмијум пигмент породице, боје су жута, наранџаста, црвена и мрко-жута.

Ово није случај са растворљивим бојама за полимерне системе. У већини породица хемијских група, скоро да је читава дуга видљива од црвене, наранџасте, жуте, зелене, плаве, индиго и љубичасте.

Већина растворљивих боја показује слабу брзину светлости у бојама или у палетама боја. Са друге стране, пуне боје могу такође имати добар учинак. На пример, црвена боја која се користи за аутомобилска сочива задњих светала, показује изузетну брзину светлости и отпорност на различите временске услове, када је у пуној боји. Друга чињеница указује да одређена боја у полимерном систему не мора да је растворљива у самом полимеру, а може бити раствољива у компонентама система. Компонента може бити мазиво, стабилизатор, антиоксиданс, или било који други адитив у коме ће се боја разградити. Растворљиве боје су обично врло јаке и поседују велику растворљиву моћ.

3. КОЛОРИМЕТРИЈА

3.1. Природа светлости

"Светлост" је израз који се користи у чисто објективном или физичком смислу и односи се на електромагнетне таласе или фотоне.

Према психофизичкој дефиницији, израз "светлост" представља онај вид енергије електромагнетног зрачења којег је посматрач свестан преко визуелног осећаја који настаје надражајем мрежњаче ока.

Видљив део електромагнетног спектра је таласних дужина од 380 до 780 nm, односно фреквенције од 4×10^{14} Hz до $7,9 \times 10^{14}$ Hz. Светлост истовремено испољава особине таласа и честица. Светлосна честица, квант, је фотон.

Основне карактеристике светлости, схваћене као таласа, су:

- интензитет (пропорционалан амплитуди таласа),
- фреквенција, таласна дужина или боја и
- поларизација.

Таласна дужина светлости се доводи у везу са њеном фреквенцијом преко константе њене брзине:

$$c = \lambda \cdot f,$$

при чему су:

c – брзина светлости, константа Универзума - 299820 km/s,

λ – таласна дужина, основна јединица - метар (m),

f – фреквенција, основна јединица - херц (Hz, s⁻¹).

3.2. Физиолошка осетљивост

Човек и остале животиње имају различит биолошки састав ока, тако није свима нека боја поједнако видљива. Зато се за јачину светлости поред физичке јединице ват (Watt) употребљава још физиолошка јединица лумен (lm). Значи ако је нека светлост јачине нпр., 1 лумен, онда има човек исти осећај видљивости било које боје та светлост била. Али у физичком смислу, за нас није исто ако је нека светлост јачине 1 ват, јер имамо осећај, да је то светло јачине једног вата ако је зелене боје доста јаче него црвене или плаве.

Видљивост боја приказује доња табела:

Таласна дужина (nm)	Видљивост $V(\lambda)$
400	0,0004
420	0,004
440	0,023
460	0,06
480	0,139
500	0,323
520	0,71
540	0,954
560	0,995
580	0,87
600	0,631
620	0,381
640	0,175
660	0,061
680	0,017
700	0,004

Табела 1. Видљивост боја

На основу приказаних података може се приметити, да је најјача боја на $\lambda = 540\text{--}555\text{ nm}$, а то је таласна дужина за жуто-зелену боју. То је разлог, зашто се за сигнална светла (семафори возила) користе зелена, жута и црвена светла, на која је наше око најосетљивије.

Црна боја није боја већ одсуство боје. Људски мозак не прима никакав сигнал приликом гледања у црну боју.

Према адитивном принципу све боје су комбанације RGB - red, green, blue, значи да је могуће сваку боју направити комбинујући црвену, плаву и зелену. Бела је присуство свих боја а црна је одсуство свих боја. Пример како се од три боје добијају најразличитије боје је мастило штампача у боји. На овом принципу раде и монитори рачунара или класични ТВ уређаји.

3.3. Појам колориметрије

Боју сачињавају оне карактеристике светлости које су другачије од просторних и временских нехомогености; под светлошћу се подразумева енергија зрачења коју прима човек преко визуелних осећаја који настају побуђивањем мрежњаче његовог ока [3].

Под карактеристикама светлости подразумевају се, светлосни флуks као мера ефективности светлости при изазивању осећаја сјајности, доминантна таласна дужина и чистоћа боје које се означавају као хроматичност светлости.

Количине емитованог светлосног флуksа појединих извора зависе од величине одговарајућих побудних сигнала на улазу. Ако се величине ових сигнала мењају, а светлосни флуksеви извора адитивно мешају добија се светлосни извор чију је боју могуће мењати у широким границама.

Наука која се бави мерењем боје зове се колориметрија.

Циљ колориметрије, грана психофизике, је да пружи прост и прецизан начин мерења и спецификације светлости емитоване из извора или рефлектоване са неког објекта.

3.4. Трихроматска особина вида

Ако је светлосни извор монохроматичан, његов визуелни ефекат може се приказати са две величине:

- светлосни флуks и
- боја светлости.

Светлосни флуks показује да ли је извор светлости више или мање светао, док је боја светлости одређена таласном дужином радијација. Око је, у том погледу, јединствени рецептор јер се утицај монохроматичног извора на све друге рецепторе може приказати само једном величином, тј. флуksом.

$$\phi = k_m y_\lambda P \quad (3.1)$$

Фактор y_λ тада представља одговарајућу релативну осетљивост рецептора. И у случају када је спектар извор континуалан, односно када емитује бесконачан број монохроматичних радијација, утицај извора на рецепторе, изузев ока, може се израчунати само флуksом:

$$\phi = k_m \int y_\lambda dP, \quad (3.2)$$

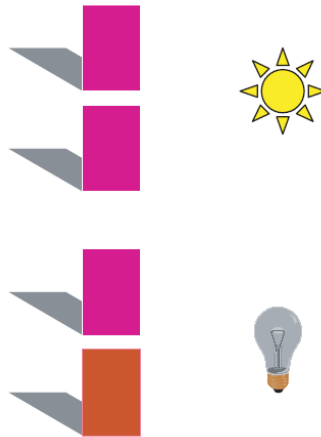
где је:

- dP – елементарни флуks радијација који одговара интервалу $d\lambda$.

Светлости различите спектралне карактеристике, а исте боје, називају се метаметри.

За сваку боју светлости постоји бесконачан број метаметара, а степен метамеризма одређује величина разлике између њихових спектралних карактеристика.

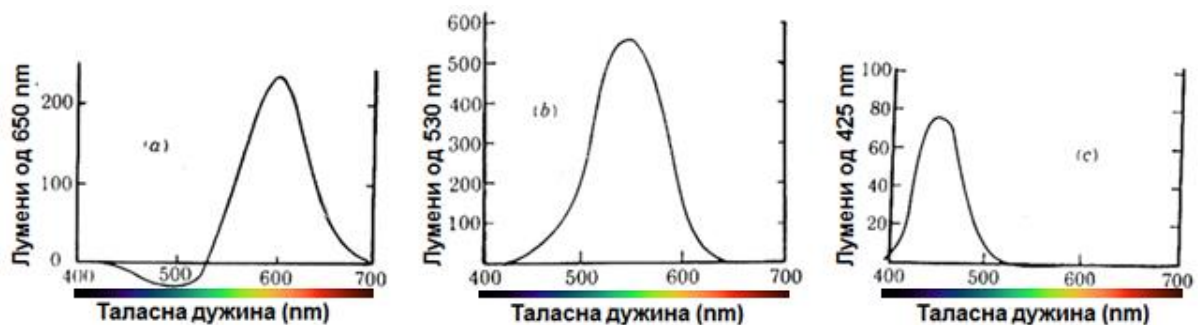
Експериментално је утврђено да је вид триваријантан, тј. да су поред флуksа довољне још две величине да се прикаже визуелни ефекат радијација континуалног спектра. Услед тога се за вид каже да је трихроматске природе.



Слика 1. Шематски приказ метамеризма [1]

Феномен метамеризма представља основу трихроматске колориметрије [1].

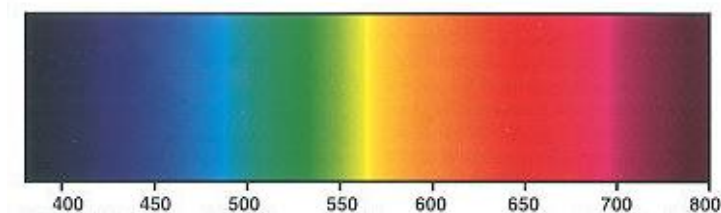
Захваљујући трихроматској особини вида на мрежњачу ока је могуће адитивно суперпонирати флуksеве три погодна изабрана извора и остварити визуелан осећај широког опсега боја мењајући само релативан однос флуksева.



Слика 2. Број лумена за сваку од три монохроматичне компоненте

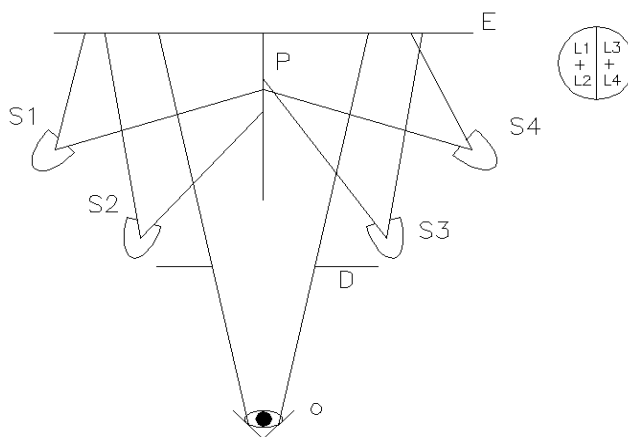
Слика показује, за одређене компоненте, количине сваке компоненте неопходне за одређивање спектралне боје дате таласне дужине. Ове компоненте су по себи спектралне боје; црвена на таласној дужини од 650 nm, зелена на таласној дужини од 530 nm и плава на таласној дужини од 425 nm. (Под спектралном бојом подразумева се светлосни сноп сачињен од уског интервала таласних дужина).

Под тзв. "видљивим спектром" подразумева се само онај део који може да обухвати људско око, од ≈ 450 nm таласне дужине, до ≈ 700 nm таласне дужине ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ или билионити део метра).



Слика 3. Видљиво подручје спектралне области

3.5. Сабирање светлосног флукса



Слика 4. Шематски приказ принципа рада колориметра (Круг на десној страни означава изглед поља који се види из тачке O) [4]

На слици приказан је принцип рада колориметра. Заклон (E), подељен у два дела преградом (P), рефлектује једнако и дифузно све радијације видљивог дела спектра. Када се светлосним изворима S1 и S2 осветли једна половина заклона, а изворима S3 и S4 друга, мењањем јачине извора може се подесити да сјајности (L) обе половине буду једнаке, тј. остварити једнакост:

$$L_1 + L_2 = L_3 + L_4 \quad (3.3)$$

Ако су, при томе, и боје обе половине видљивог застора једнаке, добијено стање изражава се једначином:

$$L_1(S_1) + L_2(S_2) = L_3(S_3) + L_4(S_4), \quad (3.4)$$

где $L(S)$ означава (L) јединица светлости (S) у фотометријским јединицама сјајности, на пример, cd/m^2 .

Колориметар је могуће уравнотежити, тј. постићи визуелно изједначење обе половине колориметра, када су извори S1 и S2 монохроматични, а на месту извора S3 и S4 друга половина колориметра осветли извором неке стандардне беле светлости, на пример извором W-светлости. При томе је потребно, поред подешавања сјајности L_1 и L_2 , мењати и таласне дужине монохроматичних извора S1 и S2.

Карактеристично је у овом случају, да се боје извора S1 и S2 потиру у смеши иако се њихове сјајности сабирају.

Таласне дужине монохроматичне светлости које мешањем стварају одређену белу светлост називају се комплементарним таласним дужинама. Одговарајућа колориметријска једначина гласи [1]:

$$L_1(\lambda_1) + L_2(\lambda_2) = \lambda_w(W) \quad (3.5)$$

Одређена бела светлост се, дакле, не може добити мешањем било које две монохроматичне светлости.

У широком опсегу спектра електромагнетног зрачења, међутим, смеша две монохроматичне светлости увек даје светлост коју је у колориметру могуће изједначити са смешом беле и неке треће, додатно изабране монохроматичне светлости. Изражено колориметријском једначином тада је:

$$L_1(\lambda_1) + L_2(\lambda_2) = L_w(W) + L_\lambda(\lambda) \quad (3.6)$$

Таласна дужина монохроматичне светлости (λ) назива се доминантном таласном дужином смеше светлости извора S_1 и S_2 .

Уколико се претпостави да је у колориметру остварено изједначење представљено једначином (3.6) и да се са обе стране колориметра дода иста сјајност L_3 неке треће монохроматичне светлости S_3 . Боје светлости са обе стране видног поља промениће се једнако, тј. колориметар ће и даље остати уравнотежен. Међутим, смеша светлости $L(\lambda)$ и $L_3(\lambda_3)$ еквивалентна је, према једначини (3.6), смеси беле светлости $kL_w(W)$ са одговарајућом светлости $L_\lambda(\lambda)$:

$$L_1(\lambda_1) + L_2(\lambda_2) + L_3(\lambda_3) = L_w(W) + L_\lambda(\lambda) \quad (3.7)$$

где је:

$$L_w = (1 + k)L_w.$$

На начин сличан претходном могуће је показати да је смеша бесконачно много монохроматичних извора, тј. светлост континуалног спектра, еквивалентна смеси беле светлости са неком одређеном монохроматичном светлости, тј. да је:

$$\sum_{n=1}^{\infty} L_n(\lambda_n) = L_w(W) + L_\lambda(\lambda) \quad (3.8)$$

Једначином (3.8) показана је уједно и експериментална потврда триваријантног карактера вида. Наиме, на десној страни једначине променљиве су само три величине:

- доминантна таласна дужина (λ) и
- две сјајности (L_w и L_λ).

Интересантно је рећи да је боја монохроматичног извора у једначини (3.8) једнака боји комплексне светлости, само је интензивнија. Осим тога, доминантна таласна дужина (λ) налази се обично у близини максималне спектралне карактеристике комплексне светлости.

Од три величине са којима се, према једначини (3.8), могу дефинисати карактеристике светлости свих боја, изузев пурпурних, у колориметрији се користи не само доминантна таласна дужина (λ). Друга величина која се користи је $L = L_w + L_\lambda$, тј. сјајност смеше, а трећа величина је одређена једначином:

$$p_c = \frac{L_\lambda}{L}. \quad (3.9)$$

Ако се у једначини (3.8) не мења (λ), неће се мењати ни основна боја светлости, али променом односа (L_w) и (L_λ) боја светлости ће изгледати мање или више интензивна.

Уколико је $L_\lambda=0$, светлост је бела, а ако је $L_w=0$ она је монохроматична, односно чиста боја. Додавање беле светлости смањује колориметријску чистоћу боје p_c , тј. њено засићење. Јарке боје су боје великог засићења, а засићење бледе, пастелне боје је мало. Колориметријска чистоћа је, дакле, величина која одређује једну од карактеристика светлости, однос сјајности монохроматичне компоненте у смеши са сјајношћу смеше и она означава психофизичку величину која се може мерити. Колориметријска чистоћа је константна и једнака јединици за све монохроматичне светлости. Засићење је чисто психолошка величина са којом се, такође, одређује до које се мере нека боја разликује од беле боје.

Насупрот колориметријској чистоћи, осећај засићења за монохроматичне боје није константан. Жута боја, на пример, изгледа оку много мање засићена него љубичаста боја исте колориметријске чистоће.

Основне законе колориметрије је поставио немачки професор Х. Гросман.

Први Гросманов закон: око може разликовати само три параметра светлости која се могу изразити доминантном таласном дужином, сјајношћу и чистоћом.

Други Гросманов закон: боја двокомпонентне светлости мења се континуално ако се континуално мења једна компонента светлости, а друга задржава константном.

Трећи (најзначајнији) Гросманов закон: светлости исте боје, тј. исте доминантне таласне дужине, чистоће и сјајности стварају идентичан ефекат у смеши, без обзира на њихове спектралне карактеристике.

На Гросмановим законима је заснована трихроматска колориметрија.

У видљивом спектру радијација постоје парови компонената који у смеши стварају светлост еквивалентну смеши беле и монохроматичне светлости.

Захваљујући трихроматској карактеристици вида, може се једна страна колориметра осветлити само белом светлошћу и постићи изједначење осветљавајући другу страну са три погодна изабрана монохроматична извора. Ако се мења релативна сјајност ових извора, мењаће се и резултантна боја смеше у широким границама. Немогуће је, међутим, у колориметру изједначити једну монохроматичну светлост са смешом друге три монохроматичне светлости.

3.6. Колориметријске јединице

Мерење или спецификација боја помоћу три погодна изабране монохроматичне светлости, састоји се у одређивању релативног односа количина светлосних флукса потребних за слагање боја. Изабране монохроматичне светлости се тада називају примарним изворима или примарима чије се количине које служе за спецификацију боја не израчунавају јединицама сјајности. У ову сврху користи се посебна јединица изведена на основу усвојене стандардне беле светлости.

Претпоставимо да се за стандардну светлост усвоји бела светлост са равномерном расподелом енергије, тј. W-светлост и да су таласне дужине монохроматичних примара $\lambda_1=700 \text{ nm}$, $\lambda_2=546,1 \text{ nm}$ и $\lambda_3=435,8 \text{ nm}$. Ове светлости су црвене (R), зелене (G) и плаве (B) боје, сагласно Интернационалној комисији за осветљавање (I. C. I.) (1931.).

Да би се боја дефинисала колориметријским јединицама, у колориметру се претходно одреде количине примара потребне за слагање референтне беле светлости изражене неком од фотометријских величина, нпр. светлосним флуксевима Φ_{RW} , Φ_{GW} и Φ_{BW} . Уколико се једна страна колориметра осветли извором (S) непознате боје и установи да је колориметар у равнотежен када су светлосни флуксеви појединих примара Φ_{RS} , Φ_{GS} и Φ_{BS} , светлост се, поред ових психофизичких јединица, може дефинисати и количинама колориметријских јединица:

$$R = \frac{\Phi_{RS}}{\Phi_{RW}}, \quad G = \frac{\Phi_{GS}}{\Phi_{GW}}, \quad B = \frac{\Phi_{BS}}{\Phi_{BW}}. \quad (3.10)$$

Светлост (S) је дефинисана количинама (R), (G) и (B) одговарајућих примара (R), (G) и (B), тј. смешом од R јединица црвеног примара, G јединица зеленог примара и B јединица плавог примара. При томе су апсолутне величине колориметријских јединица везане за референтну белу светлост, тако да смеша од по једне јединице примара даје белу светлост (једначина 3.10).

Колориметријска једначина, изражена новим јединицама је:

$$k(S)=R(R)+G(G)+B(B), \quad (3.11)$$

а количина резултантне светлости (S) једнака је збиру количина примарних светлости:

$$k=R+G+B.$$

На основу Гросманових закона изводи се закључак да је аритметика чланова у колориметријској једначини једнака аритметици обичних бројева. Ако су, на пример, две боје одређене једначинама:

$$k_1(S_1)=R_1(R)+G_1(G)+B_1(B)$$

$$k_2(S_2)=R_2(R)+G_2(G)+B_2(B)$$

резултантна боја је:

$$k_3(S_3)=k_1(S_1)+k_2(S_2)=(R_1+R_2)(R)+(G_1+G_2)(G)+(B_1+B_2)(B) \quad (3.12)$$

Компоненте смеше две боје једнаке су збиру компонената појединих боја. Ова једнакост неће се променити ни ако се обе једначине помноже неким константним чланом. То значи да се постигнуто изједначење у колориметру неће мењати ако се сјајности појединих извора подједнако смањују или повећавају. Утврђено је да овај закључак не важи за врло мале или врло велике сјајности.

На основу једначине (3.11) може се закључити да се све боје, укључујући и чисто монохроматичну боју, могу добити мешањем одговарајућих количина примара, што није случај. Већ је речено да се монохроматична светлост $k(\lambda)$ не може остварити

мешањем друге три монохроматичне светлости. Међутим, када се на страну колориметра осветљену светлошћу $k(\lambda)$, пренесе једна од примарних светлости, на пример црвена, добија се једначина:

$$k_\lambda(\lambda) + R(R) = G(G) + B(B) \quad (3.13)$$

Усвајањем конвенције да постоје и негативне светлости, претходна једначина постаје еквивалентна једначини:

$$k_\lambda(\lambda) = -R(R) + G(G) + B(B) \quad (3.14)$$

У том се случају може рећи да се све светлости, укључујући и монохроматичне, добијају алгебарским збиром три примарне светлости. Уколико извор (S) није монохроматичан или засићење његове боје није близу јединице, све три величине могу бити позитивне.

Једначином (3.11) дефинисане су количине примара потребне за слагање светлости (S). Укупан светлосни флуks ове светлости износи:

$$\Phi_S = \Phi_{RS} + \Phi_{GS} + \Phi_{BS} = R\Phi_{RW} + G\Phi_{GW} + B\Phi_{BW} \quad (3.15)$$

Претходна једначина као и једначина (3.11) јасно указују на карактер колориметријских јединица.

Флуксеви Φ_{RW} , Φ_{GW} и Φ_{BW} представљају флуксеве колориметријских јединица. Они се међусобно разликују и њихова бројна вредност везана је за референтну белу светлост система. Обзиром да је сјајност пропорционална светлосном флуksу, следи једначина:

$$L_S = Rl_r + Gl_s + Bl_b \quad (3.16)$$

где су:

- L_S – сјајност смеше, а
- l_r , l_s и l_b – сјајности колориметријских јединица.

У приказу начина одређивања количина R, G и B, светлосни флуks, односно сјајност референтне беле светлости није била одређена. Разлог томе је чињеница да се боја светлости не мења ако се мења само њена сјајност и то у широким границама промене сјајности. Управо у тим границама врше се мерења у колориметрији, јер су она у већини практичних случајева везана за одређивање боје светлости, независно од њене сјајности. У практичној колориметрији сјајност светлости одређује се посебним мерењем помоћу фотометра.

Сјајност референтне беле светлости је, услед тога, могуће нормализовати и узети да је једнака јединици. Како је за ову светлост $R=G=B=1$, то је, према једначини (3.16):

$$L_S = L_w = l_r + l_g + l_b, \quad (3.17)$$

где су:

- l_r , l_g и l_b – нормализоване јачине сјајности.

Обзиром да се боја светлости може мерити независно од њене сјајности, за спецификацију боја довољно је познавати само релативан однос примара у смеши.

Због тога је погодно нормализовати и количине R , G и B и добити величине зависне само од боје. То се постиже дељењем обе стране једначине (3.11) са $R+G+B$. Боја светлости, тј. њен квалитет, одређен је тада релацијом:

$$(S)=r(R)+g(G)+b(B) \quad (3.18)$$

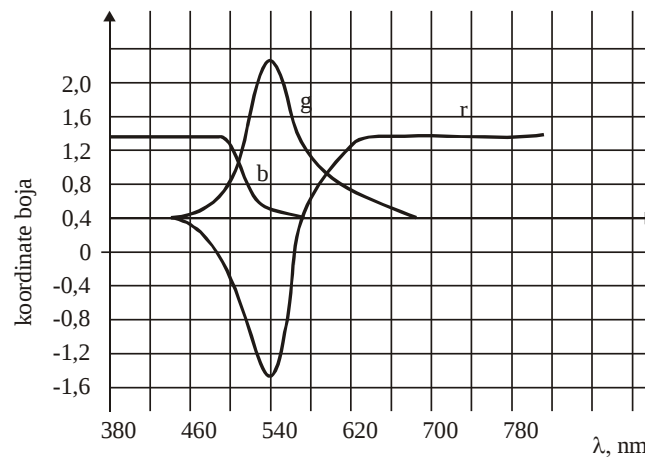
где су:

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad (3.19)$$

$$r+g+b=1 \quad (3.20)$$

Величине r , g и b називају се координатама боја, сходно томе боја се може приказати графички у неком координатном систему.

Посебан значај у колориметрији представља одређивање координата боја за светлост (S) чија је спектрална карактеристика (P_λ) позната. У том случају потребно је располагати подацима о количинама примара (R) , (G) и (B) неопходних за слагање светлости са равномерном расподелом енергије. Пошто су ове количине од основног значаја за колориметрију, означавају се посебним симболима $\overline{r_\lambda}$, $\overline{g_\lambda}$ и $\overline{b_\lambda}$, и називају тежинским функцијама или дистрибуционим коефицијентима.



Слика 5. Координате спектралних боја за стандардног посматрача

Како су познати дистрибуциони коефицијенти за све таласне дужине видљивог спектра, и ако је позната спектрална карактеристика светлости (S) , тада је за ту светлост [1]:

$$R = \sum (P_\lambda \overline{r_\lambda}), \quad G = \sum (P_\lambda \overline{g_\lambda}), \quad B = \sum (P_\lambda \overline{b_\lambda}). \quad (3.21)$$

Израчунавање дистрибуционих коефицијената изводи се коришћењем познатих координата спектралних боја (слика) и података о релативној осетљивости ока (y_λ).

Као што је наведено, симболима $\overline{r_\lambda}, \overline{g_\lambda}, \overline{b_\lambda}$, означене су количине потребне за слагање појединих компонената стандардног светлосног извора (W). За наведени извор светлосни флуks је пропорционалан величини (y_λ). Ако је при томе спектрална радијанца ($L_{e\lambda}$) извора (W) једнака јединици, тада је:

$$L_\lambda = k_m y_\lambda.$$

Из овога следи, према једначини (3.16):

$$k_m y_\lambda = l_r \overline{r_\lambda} + l_g \overline{g_\lambda} + l_b \overline{b_\lambda}.$$

Међутим, колориметријске количине пропорционалне су одговарајућим координатама боја:

$$\overline{r_\lambda} = k_\lambda \cdot r_\lambda; \quad \overline{g_\lambda} = k_\lambda \cdot g_\lambda; \quad \overline{b_\lambda} = k_\lambda \cdot b_\lambda$$

Из претходних релација се добија да је фактор пропорционалности:

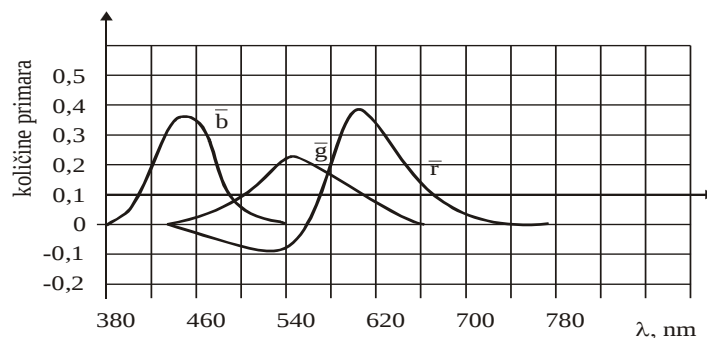
$$k_\lambda = \frac{k_m \cdot y_\lambda}{l_r r_\lambda + l_g g_\lambda + l_b b_\lambda}. \quad (3.22)$$

Када су једначине сјајности примара l_r, l_g и l_b познате, за сваку таласну дужину могуће је израчунати одговарајући фактор пропорционалности (k_λ), а самим тиме и дистрибуциони коефицијент.

Када се помоћу добијених података за више таласних дужина, нацртају криве (слика 6.), површине које обухватају поједине криве са апсцисом морају бити једнаке, јер је светлост са равномерном расподелом енергије, референтна светлост система. Наведена светлост, као што је речено, добија се смешом од по једне јединице примара. Ако овај услов није задовољен, рачун се мора понављати са другим вредностима l_r, l_g и l_b .

Наведеним поступком одређене су јединичне сјајности примара:

$$l_r=0,177, \quad l_g=0,812 \quad \text{и} \quad l_b=0,011. \quad (3.23)$$



Слика 6. Тежинске функције за стандардног посматрача;
црвени примар=700 nm; зелени примар=564,1 nm; плави примар=435,8 nm

3.7. Просторна представа боја

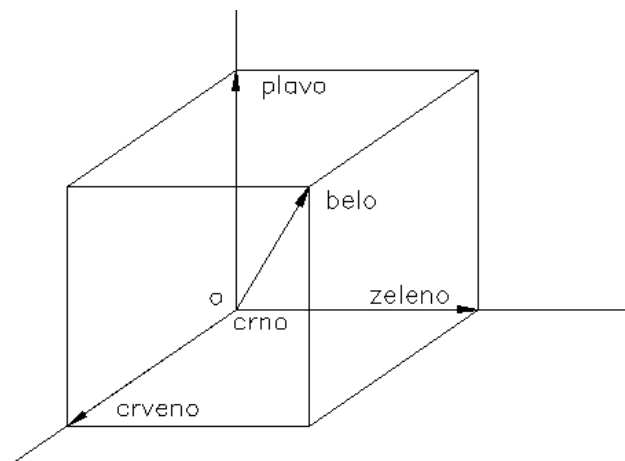
Линеарна природа мешања боја, исказана Гросмановим законима, допушта да се боје могу представљати оријентисаним дужима, односно векторима, и да се комбинације боја могу одређивати применом векторске алгебре.

У векторској алгебри уобичајено је да се јединични вектори означавају симболима i , j и k .

Ако се за јединичне векторе светлосних примара усвоје ознаке (R) , (G) и (B) , векторска једначина боја биће истог облика као и колориметријска:

$$C(S) = R(R) + G(G) + B(B)$$

Боја је, дакле, одређена просторним вектором $C(S)$ или збиром његових компонената дуж оса неког координатног система. Када је систем правоугли, што је најчешћи случај, и када се на осама означе јединични вектори примара, може се нацртати јединична коцка боја.



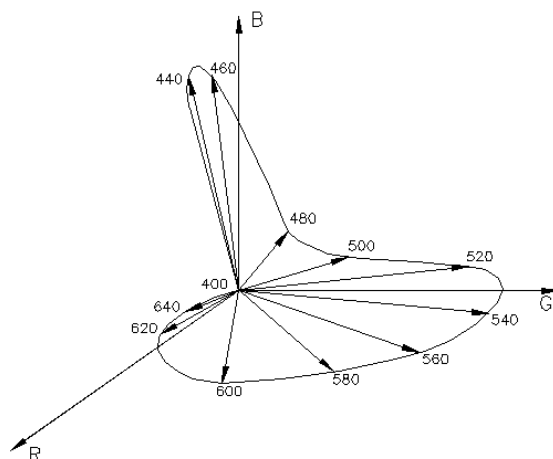
Слика 7. Јединична коцка боја

Јединична коцка боја представља простор у којем се налазе све боје које се могу добити мешањем позитивних количина примара. Координатни почетак означава црну, а врх дијагонале белу боју, док се остале нијансе сивог налазе на дијагонали.

Вектори који представљају физички остварљиве боје, али за чије су остварење потребне негативне вредности неких примарних боја, налазе се изван октанта у којем је смештена јединична коцка.

На слици 8 приказани су вектори монохроматичних радијација нацртани коришћењем дистрибуционих коефицијената.

Крива која пролази кроз врхове ових вектора почиње и завршава у координатном почетку јер се радијације дуже од 780 nm и краће од 380 nm не виде.



Слика 8. Векторска представа спектралних боја

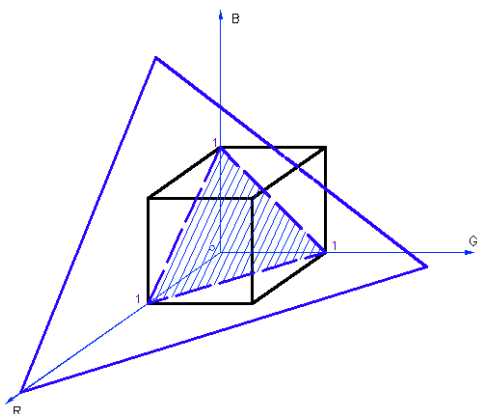
Према једначини (3.15) за укупан светлосни флуks, ако се количине примара боје (S) промене за фактор (α) промениће се и њена сјајност за исти фактор, тј. постаће (αL_S). То, уједно, значи да ће се и дужина вектора боје (S) променити (α) пута. Дужина вектора је пропорционална сјајности боје коју представља.

На основу претходног разматрања закључује се да, обзиром да дужина просторног вектора одређује само сјајност боје, правцем вектора одређене су њене друге две карактеристике, доминантна таласна дужина и засићење.

Раван на којој се налазе врхови три јединична вектора назива се јединична раван (слика 9). На њој се налазе боје које се могу дефинисати једначином:

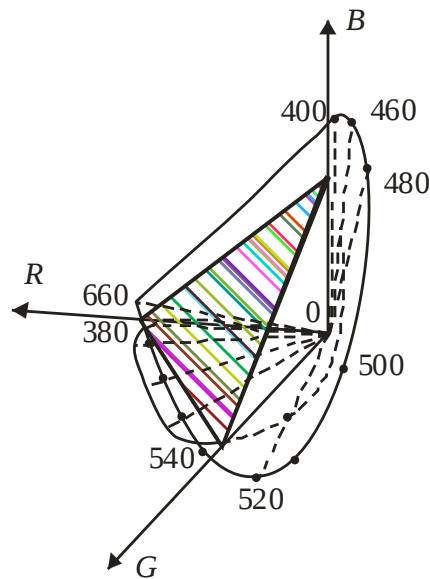
$$S = m(R) + n(G) + p(B)$$

где је: $m+n+p=1$.



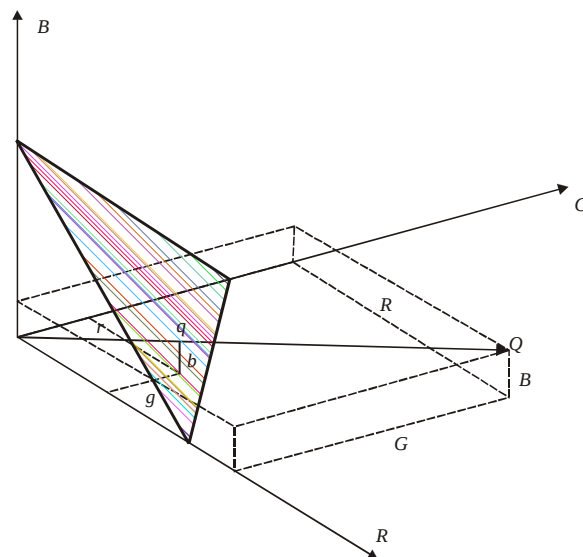
Слика 9. Јединична раван RGB – система

Наведена раван има посебан значај у колориметрији, јер пресек вектора боје са овом равни одређује доминантну таласну дужину и засићење боје. Ако се вектори на слици 9 продуже до пресека са јединичном равни, тачке пресека образују геометријско место тачака, односно криву потковичастог облика на којој се налазе све чисте спектралне боје.



Слика 10. Просторни приказ пресека вектора спектралних боја са јединичном равни

Геометријско значење координата боја објашњава се дијаграмом:



Слика 11. Веза између координата боје и координата вектора боје

На дијаграму је приказан вектор (Q) са координатама (R), (G) и (B) који представља неку одређену боју. Вектор сече јединичну раван у тачки (g) са координатама (r), (g) и (b).

Пошто је:

$$r : g : b = R : G : B$$

то је и:

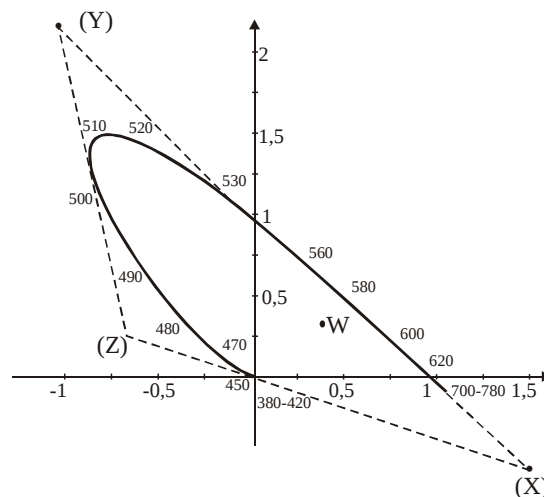
$$\frac{R}{r} = \frac{G}{g} = \frac{B}{b} = \frac{R+G+B}{r+g+b} = k.$$

Како је за јединичну раван $r+g+b=1$, следи да је:

$$r = \frac{R}{R+G+B}; \quad g = \frac{G}{R+G+B}; \quad b = \frac{B}{R+G+B}. \quad (3.23)$$

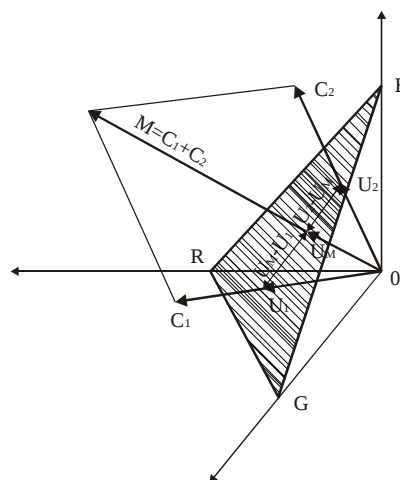
Координате боја (једначина 3.19), представљају координате пресечне тачке тачке вектора боје са јединичном равни.

Када се крива спектралних боја са јединичне равни пројектује на RG-раван, добија се врло једноставан начин означавања, тј. спецификација боја. На дијаграму приказаном на слици 12 уочава се да су крајње тачке криве спојене правом линијом.



Слика 12. Дијаграм боја у RG-равни. Пурпурне боје максималног засићења леже на прави која спаја тачке са 400 nm и 700 nm

Поједине тачке на овој правој означавају боје којих нема у природи, али које се могу остварити мешањем крајњих спектралних боја. Ове се боје називају чистим пурпурним бојама максималног засићења. На дијаграму је са (W) означена пројекција пресека јединичне равни дијагоналном јединичне коцке. Дата тачка, чије су координате $r=1/3$, $g=1/3$ и $b=1/3$, означава референтну белу светлост.



Слика 13. Одређивање смеше боја

Тачке (1,0), (0,1) и (0,0) представљају црвени, зелени и плави примар, а све остале физички остварљиве боје налазе се на површини коју обухвата крива.

Предпоставимо да вектори (C_1) и (C_2) , (слика 13) представљају боје које треба помешати:

$$C_1 = R_1(R) + G_1(G) + B_1(B)$$

$$C_2 = R_2(R) + G_2(G) + B_2(B).$$

Њихова сума износи:

$$U = (R_1 + R_2)(R) + (G_1 + G_2)(G) + (B_1 + B_2)(B) \quad (3.24)$$

Ако се са U_1 , U_2 , и U_M означе одговарајући вектори који се завршавају у јединичној равни, тада је:

$$U_1 = r_1(R) + g_1(G) + b_1(B)$$

$$U_2 = r_2(R) + g_2(G) + b_2(B)$$

$$U_M = r_M(R) + g_M(G) + b_M(B) \quad (3.25)$$

Примењујући једначине (3.19) и (3.24), израчунава се да је:

$$r_M = \frac{R_1 + R_2}{t_1 + t_2}; \quad g_M = \frac{G_1 + G_2}{t_1 + t_2}; \quad b_M = \frac{B_1 + B_2}{t_1 + t_2}; \quad (3.26)$$

где су:

- $t_1 = R_1 + G_1 + B_1$ и
- $t_2 = R_2 + G_2 + B_2$.

Координате непознате боје могу се одредити и графичким путем:

$$U_2 - U_M = k(U_M - U_1),$$

и применом једначине (3.25) добија се:

$$(r_2 - r_M)(R) + (g_2 - g_M)(G) + (b_2 - b_M)(B) = k(r_M - r_1)(R) + k(g_M - g_1)(G) + k(b_M - b_1)(B).$$

Пошто су коефицијенти уз јединичне векторе са леве и десне стране једнаки, фактор пропорционалности је:

$$k = \frac{U_2 - U_M}{U_M - U_1} = \frac{r_2 - r_M}{r_M - r_1} \quad (3.27)$$

На основу једначина (3.27), (3.19) и (3.26) добија се фактор пропорционалности у облику:

$$k = \frac{R_1 + G_1 + B_1}{R_2 + G_2 + B_2}. \quad (3.28)$$

Из претходног израза следи да је однос растојања од тачке која одговара смеши боја до тачака U_1 и U_2 обрнуто сразмеран укупном броју примарних јединица одговарајућих боја.

Начином којим је приказано да смеша две боје лежи на прави која их спаја, могуће је доказати да се смеша позитивних количина три боје увек налази унутар троугла одређеног овим бојама.

Да би се помоћу једначина (3.26) и (3.27) одредиле координате смеше боја (C_1) и (C_2), потребно је знати количине R_1, G_1, B_1 и R_2, G_2, B_2 . Ако су дате само координате C_1 и C_2 , тј. r_1, g_1, b_1 и r_2, g_2, b_2 , неопходно је познавати и њихове сјајности.

Коришћењем једначина (3.15), (3.19) и (3.20), добија се:

$$R = \frac{rL}{rl_r + gl_g + bl_b}, \quad G = \frac{gL}{rl_r + gl_g + bl_b}, \quad B = \frac{bL}{rl_r + gl_g + bl_b}. \quad (3.29)$$

За одређивање координата боје смеше није потребно познавати апсолутне сјајности компонената.

3.8. Трансформација координата

У колориметрији је често потребно прелазити из једног система примара у други. Мада су трансформације општег карактера, претпостављено је да се прелази из система са примарима (X), (Y), (Z) и референтном W -светлости у RGB систем.

Систем XYZ узима се за примарни јер је то, као што ће у следећем поглављу бити приказано, стандардни колориметријски систем. У овом поглављу довољно је нагласити да су светлосни примари овог система имагинарни, тј. не могу се физички реализовати. Осим тога, сјајности примара (X) и (Z) пошто су фиктивне, једнаке су нули, тако да је укупна сјајност одређена само сјајношћу примара (Y).

У дијаграму на слици 14 приказана су два координатна система XYZ и RGB , као и вектор OS који представља неку одређену боју. У XYZ систему ова боја је одређена једначином:

$$C(S) = X(X) + Y(Y) + Z(Z) \quad (3.30)$$

а у RGB сиситему једначином:

$$C(S) = R(R) + G(G) + B(B) \quad (3.31)$$

Величина X представља алгебарску пројекцију вектора OS на x -осу и једнака је суми алгебарских пројекција вектора OR , OG и OB на исту осу, односно:

$$X = X_r + X_g + X_b \quad (3.32)$$

Овај закључак важи и за пројекције вектора OS на остале две осе:

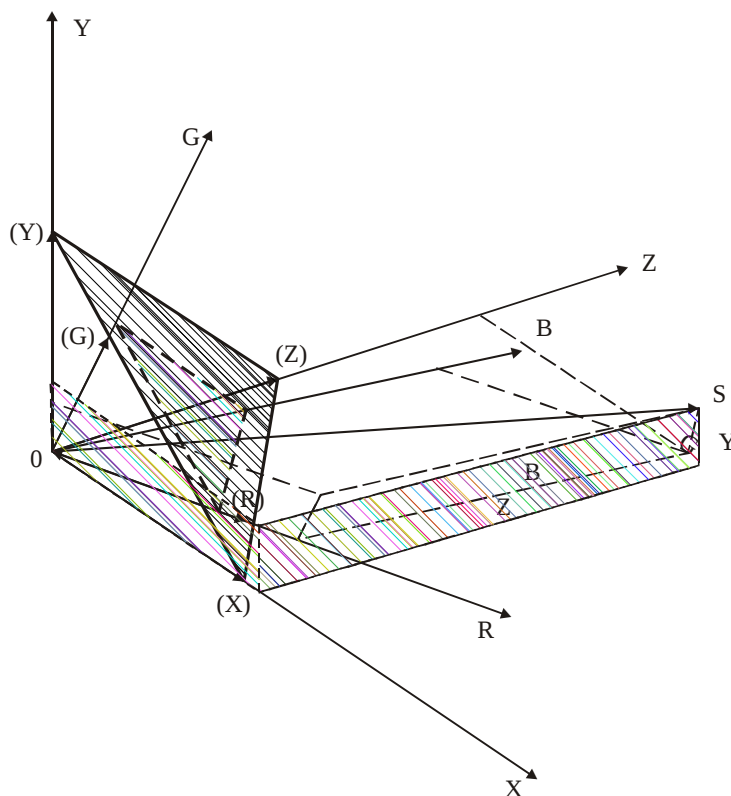
$$\begin{aligned} Y &= Y_r + Y_g + Y_b \\ Z &= Z_r + Z_g + Z_b \end{aligned} \quad (3.33)$$

Заменом величина X , Y , Z , из (3.32) и (3.33) у (3.30), векторска једначина боје (S), има облик:

$$\begin{aligned} C(S) &= [X_r(X) + Y_r(Y) + Z_r(Z)] + [X_g(X) + Y_g(Y) + Z_g(Z)] + \\ &+ [X_b(X) + Y_b(Y) + Z_b(Z)] \end{aligned} \quad (3.34)$$

Обзиром да једначине (3.31) и (3.30), тј. (3.34) и (3.31) представљају исту боју:

$$\begin{aligned} R(R) &= X_r(X) + Y_r(Y) + Z_r(Z) \\ G(G) &= X_g(X) + Y_g(Y) + Z_g(Z) \\ B(B) &= X_b(X) + Y_b(Y) + Z_b(Z). \end{aligned} \quad (3.35)$$



Слика 14. Просторна представа боје (S) у (RGB) и (XYZ) системима

Једначине (3.35) показују да се компоненте примара (R), (G) и (B), потребне за смешу боје (S) могу изразити и величинама XYZ -система.

Према Гросмановим законима, компоненте смеше више боја једнаке су збиру компонената појединих боја. Међутим, величине на левој и десној страни једначина

(3.35) припадају разним системима, те се за сада једино може рећи да су, због линеарне комбинације боја, количине примара једног система пропорционалне количинама примара другог система.

Количина (R) у једначини (3.35) пропорционална је, дакле, збиру количина X_r , Y_r и Z_r , одакле следи:

$$\begin{aligned} C_r \cdot R &= X_r + Y_r + Z_r \\ C_g \cdot G &= X_g + Y_g + Z_g \\ C_b \cdot B &= X_b + Y_b + Z_b \end{aligned} \quad (3.36)$$

где су: C_r , C_g и C_b – фактори пропорционалности.

Када се изврши замена величина R , G , и B из (5.54) у (3.35) и узме у обзир да је:

$$\frac{X}{X+Y+Z} = x, \quad \frac{Y}{X+Y+Z} = y \quad \text{и} \quad \frac{Z}{X+Y+Z} = z,$$

једначине (3.35) свODE се на облик:

$$\begin{aligned} (R) &= C_r [X_r(X) + Y_r(Y) + Z_r(Z)], \\ (G) &= C_g [X_g(X) + Y_g(Y) + Z_g(Z)], \\ (B) &= C_b [X_b(X) + Y_b(Y) + Z_b(Z)]. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Изрази у угластим заградама једначина (3.37) представљају векторе у XYZ -систему чији су носачи R , G и B осе, а нападне тачке им леже у јединичној равни. Константе C_r , C_g и C_b одређују модуле вектора који у RGB -систему представљају јединичне векторе.

За трансформације координата боја најпогоднија је примена метричке алгебре.

Ако се јединице (R) , (G) и (B) и (X) , (Y) и (Z) , као и количине јединица R , G , B и X , Y , Z , у једначинама (5.48) и (5.49) сматрају елементима матрица-колона, тада се:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} & A &= \begin{bmatrix} (R) \\ (G) \\ (B) \end{bmatrix} \\ W &= \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} & W &= \begin{bmatrix} (X) \\ (Y) \\ (Z) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

једнакост боја изражена једначинама (3.30) и (3.31), може се представити у метричком облику:

$$\tilde{A} \cdot A = \tilde{W} \cdot W \quad (3.38)$$

где су:

- $\tilde{A}, \tilde{W}$ – транспоноване матрице матрица A и W , тј. матрице врсте.

Веза између јединица A и W , одређена једначинама (3.37) може се, такође, представити у метричком облику:

$$\begin{pmatrix} (R) \\ (G) \\ (B) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_r x_r & c_r y_r & c_r z_r \\ c_g x_g & c_g y_g & c_g z_g \\ c_b x_b & c_b y_b & c_b z_b \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (X) \\ (Y) \\ (Z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (X) \\ (Y) \\ (Z) \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

или

$$A = \omega \cdot W \quad (3.40)$$

где је са ω означена матрица трансформације.

Уношењем једначине (3.40) у (3.38) добија се:

$$\tilde{A} \cdot \omega \cdot W = \tilde{W} \cdot W$$

Када се у претходном изразу изврши транспоновање матрица, израз за једнакост боја постаје:

$$\tilde{W} \cdot \tilde{\omega} \cdot A = \tilde{W} \cdot W \quad (3.41)$$

У једначини боја (3.41), коефицијенти примара (X) , (Y) и (Z) са обе стране једначине морају бити једнаки, тј. мора бити задовољена и једнакост:

$$\tilde{\omega} \cdot A = W \quad (3.42)$$

Као што је познато из метричке алгебре, ако је матрица трансформације регуларна, тј. ако детерминанта матрице $D = \det \omega \neq 0$, постоји инверзна матрица:

$$\omega^{-1} = \frac{1}{D_\omega} \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{21} & \omega_{31} \\ \omega_{12} & \omega_{22} & \omega_{32} \\ \omega_{13} & \omega_{23} & \omega_{33} \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

у којој ω_{ik} означава кофактор елемента a_{ik} у детерминанти $\det \omega$.

Ако се, дакле, обе стране једначине (3.42) помноже транспортованом инверзном матрицом $\tilde{\omega}^{-1}$, добија се:

$$A = \tilde{\omega}^{-1} \cdot W \quad (3.44)$$

јер је производ $\tilde{\omega} \cdot \tilde{\omega}^{-1}$ једнак јединичној матрици.

Применом матричне једначине (3.44) одређује се количина (R) , (G) , (B) , ако су познате координате примара (R) , (G) и (B) у XYZ -систему и фактори пропорционалности C_r , C_g и C_b .

Размотримо један начин одређивања ових фактора. Пошто је транспортована матрица:

$$\tilde{\omega} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

то је, према једначини (3.44):

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \frac{1}{D_{\tilde{\omega}}} \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

где је:

- ω_{ik} – кофактор елемента a_{ik} у детерминанти $\det \tilde{\omega}$.

Користећи се матрицом трансформације из једначине (3.39) лако се израчунава да су елементи матрице у једначини (3.46) одређени изразима:

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{11}}{D_{\tilde{\omega}}} &= \frac{\begin{vmatrix} y_g & y_b \\ z_g & z_b \end{vmatrix}}{C_r D} = \frac{\alpha_1}{C_r}; & \frac{\omega_{22}}{D_{\tilde{\omega}}} &= \frac{-\begin{vmatrix} x_g & x_b \\ z_g & z_b \end{vmatrix}}{C_r D} = \frac{\beta_2}{C_r}; & \frac{\omega_{13}}{D_{\tilde{\omega}}} &= \frac{\begin{vmatrix} x_g & x_b \\ y_g & y_b \end{vmatrix}}{C_r D} = \frac{\chi_1}{C_r}; \\ \frac{\omega_{21}}{D_{\tilde{\omega}}} &= \frac{-\begin{vmatrix} y_r & y_b \\ z_r & z_b \end{vmatrix}}{C_g D} = \frac{\alpha_2}{C_g}; & \frac{\omega_{22}}{D_{\tilde{\omega}}} &= \frac{\begin{vmatrix} x_r & x_b \\ z_r & z_b \end{vmatrix}}{C_g D} = \frac{\beta_2}{C_g}; & \frac{\omega_{23}}{D_{\tilde{\omega}}} &= \frac{-\begin{vmatrix} x_r & y_b \\ y_r & y_b \end{vmatrix}}{C_r D} = \frac{\chi_2}{C_g}; \\ \frac{\omega_{31}}{D_{\tilde{\omega}}} &= \frac{\begin{vmatrix} y_r & y_g \\ z_r & z_g \end{vmatrix}}{C_b D} = \frac{\alpha_3}{C_b}; & \frac{\omega_{32}}{D_{\tilde{\omega}}} &= \frac{-\begin{vmatrix} x_r & x_g \\ z_r & z_g \end{vmatrix}}{C_b D} = \frac{\beta_3}{C_b}; & \frac{\omega_{33}}{D_{\tilde{\omega}}} &= \frac{\begin{vmatrix} x_r & x_g \\ y_r & y_g \end{vmatrix}}{C_b D} = \frac{\chi_3}{C_b}; \end{aligned} \quad (3.47)$$

у којима је:

$$D = \begin{vmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_b \end{vmatrix}$$

Уношењем израза из (3.47) у (3.46) добијају се величине R , G , B , у функцији X , Y и Z , тј.:

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\alpha_1}{C_r} X + \frac{\beta_1}{C_r} Y + \frac{\chi_1}{C_r} Z = \frac{\begin{vmatrix} X & x_g & x_b \\ Y & y_g & y_b \\ Z & z_g & z_b \end{vmatrix}}{C_r D} \\
 G &= \frac{\alpha_2}{C_g} X + \frac{\beta_2}{C_g} Y + \frac{\chi_2}{C_g} Z = \frac{\begin{vmatrix} x_r & X & x_b \\ y_r & Y & y_b \\ z & Z & z_b \end{vmatrix}}{C_g D} \\
 B &= \frac{\alpha_3}{C_b} X + \frac{\beta_3}{C_b} Y + \frac{\chi_3}{C_b} Z = \frac{\begin{vmatrix} x_r & x_g & X \\ y_r & y_g & Y \\ z & z_g & Z \end{vmatrix}}{C_b D}
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

Да би се применом претходних једначина одредиле константе C_r , C_g и C_b треба поред координата примара (R), (G) и (B), познавати још количине R , G , B и X , Y , Z за неку одређену референтну светлост. Ова светлост је у колориметрији увек беле боје.

За прелазак са познатог на нови, непознати систем, неопходно је познавати примаре као и референтну белу светлост непознатог система изражене координатама познатог система.

Осим тога, потребно је усвојити сјајност референтне светлости новог система како би се иста могла изразити количинама примара познатог система једначина (3.29). И у овом се случају сјајност може нормализовати и узети да је равна јединици.

Нормализовањем сјајности референтне беле светлости новог система, њена сјајност у систему XYZ одређена је са 1(Y), јер примари X и Z не доприносе сјајности.

То значи да се у XYZ - систему макар која референтна светлост новог система може изразити количинама $X=f$, $Y=1$ и $Z=g$, где су (f) и (g) одговарајуће константе.

Обзиром да је за референтну боју RGB -система $R=1$, $G=1$, $B=1$, то се, на основу једначина (3.47) за константе C_r , C_g и C_b добија:

$$C_r = \frac{\begin{vmatrix} f & x_g & x_b \\ 1 & y_g & y_b \\ g & z_g & z_b \end{vmatrix}}{D} = f\alpha_1 + \beta_1 + g\chi_1;$$

$$C_g = \frac{\begin{vmatrix} x_r & f & x_b \\ y_r & 1 & y_b \\ z_r & g & z_b \end{vmatrix}}{D} = f\alpha_2 + \beta_2 + g\chi_2; \quad (3.49)$$

$$C_b = \frac{\begin{vmatrix} x_r & x_g & f \\ y_r & y_g & 1 \\ z_r & z_g & g \end{vmatrix}}{D} = f\alpha_3 + \beta_3 + g\chi_3.$$

Ако се сада десним странама једначина (3.48) додају и одузму чланови $f\alpha_n Y$ и $g\chi_n Y$, једначине се могу писати у облику:

$$C_r R = (f\alpha_1 + \beta_1 + g\chi_1)Y + \alpha_1(X - fY) + \chi_1(Z - gY)$$

$$C_g G = (f\alpha_2 + \beta_2 + g\chi_2)Y + \alpha_2(X - fY) + \chi_2(Z - gY)$$

$$C_b B = (f\alpha_3 + \beta_3 + g\chi_3)Y + \alpha_3(X - fY) + \chi_3(Z - gY)$$

а када се узму у обзир изрази за константе C_r , C_g , и C_b , дате једначинама (3.49), следи да је:

$$R = Y + p_1(X - fY) + g_1(Z - gY)$$

$$G = Y + p_2(X - fY) + g_2(Z - gY) \quad (3.50)$$

$$B = Y + p_3(X - fY) + g_3(Z - gY)$$

где су:

$$p_1 = \frac{\alpha_1}{f\alpha_1 + \beta_1 + g\chi_1}; \quad p_2 = \frac{\alpha_2}{f\alpha_2 + \beta_2 + g\chi_2}; \quad p_3 = \frac{\alpha_3}{f\alpha_3 + \beta_3 + g\chi_3}; \quad (3.51)$$

$$g_1 = \frac{\chi_1}{f\alpha_1 + \beta_1 + g\chi_1}; \quad g_2 = \frac{\chi_2}{f\alpha_2 + \beta_2 + g\chi_2}; \quad g_3 = \frac{\chi_3}{f\alpha_3 + \beta_3 + g\chi_3}.$$

Једначине (3.48) изведене су у облику (3.49) да би се добиле компоненте разлике боја $X - fY$ и $Z - gY$.

Једна од основних карактеристика, нпр. колор телевизије је да ове компоненте морају нестати када се преносе подаци о белој светлости. Погодним избором константи (f) и (g) наведени услов је могуће остварити за сваку белу или макар коју другу боју. Ако би, на пример, референтна боја RGB -система била стандардна W -светлост, као што је у систему XYZ , било би поред $R=G=B$ и $X=Y=Z$. Из услова $X=f$, $Y=0$ и $Z-gY=0$, добило би се тада да је $f=1$ и $g=1$. За неку другу референтну боју (S) потребно је познавати количине X_S , Y_S и Z_S или њене координате у ху-дијаграму, јер је:

$$f = \frac{X_s}{Y_s} = \frac{x_s}{y_s} \quad \text{и} \quad g = \frac{Z_s}{Y_s} = \frac{z_s}{y_s}. \quad (3.52)$$

Боја за коју су компоненте $X-fY$ и $Z-gY$ једнаке нули назива се референтном или нормализованом бојом.

При прелазу са једне на другу групу примара потребно је одредити и њихове релативне доприносе у смеши. Пошто је сјајност смеше равна суми сјајности појединих примара, то се и доприноси сјајности резултатне боје од стране непознатих примара (RGB примара) могу представити изразима:

$$Rl_r = X_r l_x + Y_r l_y + Z_r l_z$$

$$Gl_g = X_g l_x + Y_g l_y + Z_g l_z$$

$$Bl_b = X_b l_x + Y_b l_y + Z_b l_z$$

Ако се узме у обзир да је $X_r = x_r T_r$, $Y_r = y_r T_r$ и $Z_r = z_r T_r$, где је $T_r = X_r + Y_r + Z_r$ и да је $C_r \cdot R = T_r$ једначина (3.36), прва од претходних једначина своди се на облик:

$$l_r = C_r(x_r l_x + y_r l_y + z_r l_z) \quad (3.53)$$

На сличан начин налази се да је:

$$l_g = C_g(x_g l_x + y_g l_y + z_g l_z)$$

$$l_b = C_b(x_b l_x + y_b l_y + z_b l_z) \quad (3.54)$$

3.9. Стандардни CIE систем

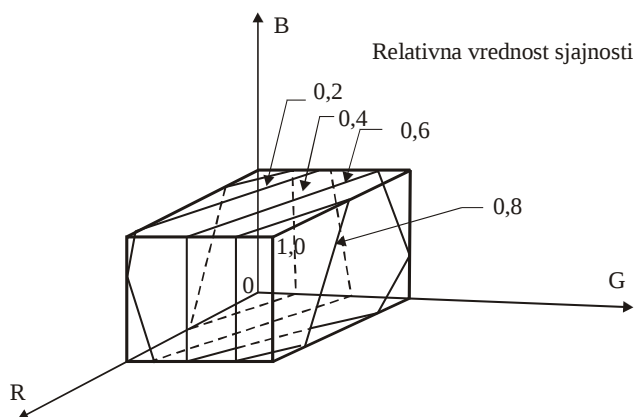
Дијаграм боја на слици 12 налази се у сва четири квадранта јер су за слагање појединих боја потребне и негативне величине примара, што представља основни недостатак овог дијаграма. Осим тога, сјајност смеше зависи од сва три примара, тј. од њихових количина у смеши. Применом RG -дијаграма, потребно је обратити велику пажњу на предзнак појединих компонената и применити сложен начин одређивања сјајности смеше. Рачун је много једноставнији када би све вредности биле позитивне, тј. када би се спектралне компоненте резултатне боје могле сложити са позитивним количинама примара.

Ако се, дакле, жели да се све реалне боје добију мешањем позитивних количина примара, примари се морају налазити изван потковичастог дијаграма.

Систем у којем су задовољени претходни услови предложен је од стране Интернационалног комитета за осветљавање - CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) и прихваћен 1931. године. Пошто се примарни услови овог система налазе изван потковичастог дијаграма, они су имагинарни и не могу се реализовати у лабораторији. За спецификацију боја или рачунске операције, међутим, потпуно су истог значаја као и реални примари.

Имагинарна природа фиктивних примара, који су означени са (X) , (Y) и (Z) , омогућује увођење још једног значајног упрошћења. Два примара, наиме, изабрана су тако да је њихова сјајност једнака нули.

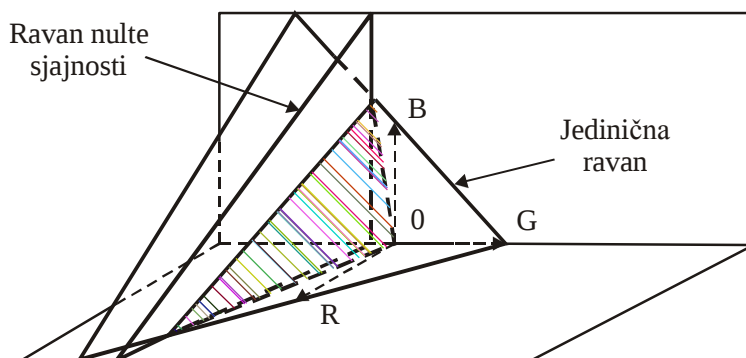
У просторној представи боја сјајност је одређена дужином вектора. То значи да нападне тачке вектора за све боје једнаке сјајности леже у једној равни која се назива раван константне сјајности (слика 15).



Слика 15. Положај равни константне сјајности у јединичној коцки боје

Ако се максимална сјајност боје означи са 1, тада раван максималне сјајности пролази кроз врх дијагонале јединичне коцке, а раван нулте сјајности кроз координатни почетак.

На слици 16 приказан је пресек јединичне равни са равни нулте сјајности, као и пројекција пресека у равни RG. Ова пројекција је на слици 12 означена са zx .



Слика 16. Пресек јединичне равни са равни нулте сјајности

Геометријско место тачака нулте сјајности у RG – равни може се одредити и рачунским путем. Када је сјајност боје једнака нули добија се:

$$l_r R + l_g G + l_b B = 0$$

односно,

$$l_r r + l_g g + l_b b = 0 \quad (3.55)$$

За колориметријске примаре, јединичне сјајности дефинисане су изразом (3.23), те се након замене $b=1-r-g$, за једначину праве zx (слика 12), добија се:

$$0,166r + 0,800g + 0,011 = 0. \quad (3.56)$$

Избором две примарне фиктивне боје тако да леже на правој zx , сјајност свих боја које се могу представити позитивним величинама примара биће одређена сјајношћу само треће примарне величине. Трећа величина, сходно томе, служи да за остале две одреди врсту боје и засићење и да уједно, представља укупну вредност сјајности резултанте боје.

При одређивању примара, рачуна се да површине троугла примара и потковичасте криве, буду што приближније. Страна троугла ux постављена је уз десну ивицу дијаграма боје, јер је дијаграм у том делу скоро права линија. Трећа страна троугла дефинисана је конвенцијом.

Координате примара (X) , (Y) , (Z) са слике 12 дате су у следећој табели:

	(X)	(Y)	(Z)
r	1,2750	-1,7394	-0,7429
g	-0,2778	2,7674	0,1409
b	0,0028	-0,0280	1,6020

Табела 2. Координате колориметријских примара (X) , (Y) , (Z)

За спецификацију боја у CIE- систему потребно је, такође, познавати одговарајуће дистрибуционе коефицијенте, тј. $\bar{x}$, $\bar{y}$ и $\bar{z}$. Одређивање ових коефицијената своди се на одређивање везе између количина X , Y , Z и R , G , B , потребних за слагање исте боје, а њу је лако извести коришћењем трансформација изнетих у претходном поглављу.

Према првој од једначина (3.48) следи:

$$X = \frac{\alpha_1}{C_x} R + \frac{\beta_1}{C_x} G + \frac{\chi_1}{C_x} B \quad (3.57)$$

Обзиром да је референтна светлост XYZ – система W -светлост, као и у колориметријском RGB – систему, то је $X=Y=Z=1$, $R=G=B=1$, а сходно томе:

$$C_x = \alpha_1 + \beta_1 + \chi_1$$

Уношењем координата r_x , g_x , b_x из претходне табеле у изразе за α_1 , β_1 , и χ_1 једначина (3.47), израчунава се да је:

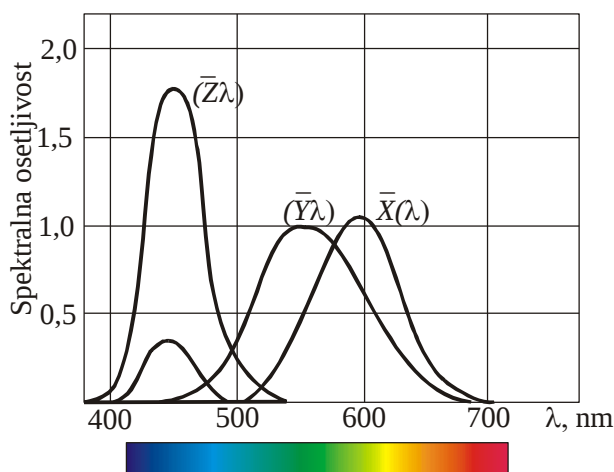
$$X = 2,7690R + 1,7518G + 1,1300B \quad (3.58)$$

На сличан начин се одређују и једначине:

$$Y=1,0000R+4,5907G+0,0601B$$

$$Z=0,0000R+0,0565G+5,5943B \quad (3.59)$$

Ове трансформације важе за све боје, укључујући и светлост са равномерном расподелом енергије. Ако се у претходним једначинама унесу вредности за $\bar{r}$, $\bar{g}$ и $\bar{b}$ из одговарајућих табела, добиће се дистрибуциони коефицијенти $\bar{x}$, $\bar{y}$ и $\bar{z}$. Овим коефицијентима, односно функцијама, дефинисане су колориметријске особине стандардног CIE-система (слика 17).



Слика 17. Криве дистрибуционих коефицијената – дијаграм спектралне осетљивости

Крива $\bar{y}$ је идентична са кривом осетљивости ока, јер је сјајност примара X и Z једнака нули.

Приказаним начином установљене су стандардне психофизичке мере боје величинама X , Y , Z , од којих је Y пропорционална сјајности. Ако је позната спектрална расподела светлости:

$$P_\lambda = S_\lambda \rho_\lambda,$$

где су:

- S_λ – карактеристика светлости, а
- ρ_λ – фактор рефлексије (за примарне изворе $P_\lambda = S_\lambda$),

величине X , Y , Z , израчунавају се преко формула:

$$\begin{aligned} X &= k \int P_\lambda \bar{x}_\lambda d\lambda, \\ Y &= k \int P_\lambda \bar{y}_\lambda d\lambda, \\ Z &= k \int P_\lambda \bar{z}_\lambda d\lambda, \end{aligned} \quad (3.60)$$

где је: k – нормализовани фактор одређен са:

$$k = \frac{100}{\int S_{\lambda} \overline{y_{\lambda}} d\lambda}. \quad (3.61)$$

Усвајањем нормализованог фактора k сјајност је нормализована на вредност 100 за површине које идеално рефлектују светлост или када светлост долази из примарног извора. Да би се одредила стварна вредност сјајности, неопходно је измерити спектралну карактеристику светлости, тј. мерити флуks по јединици површине, по јединици просторног угла и по јединици таласне дужине ($Wm^{-2}sr^{-1}m^{-1}$), а потом израчунати сјајност уз помоћ израза:

$$L = 680 \int L_{e\lambda} \overline{y_{\lambda}} d\lambda. \quad (3.62)$$

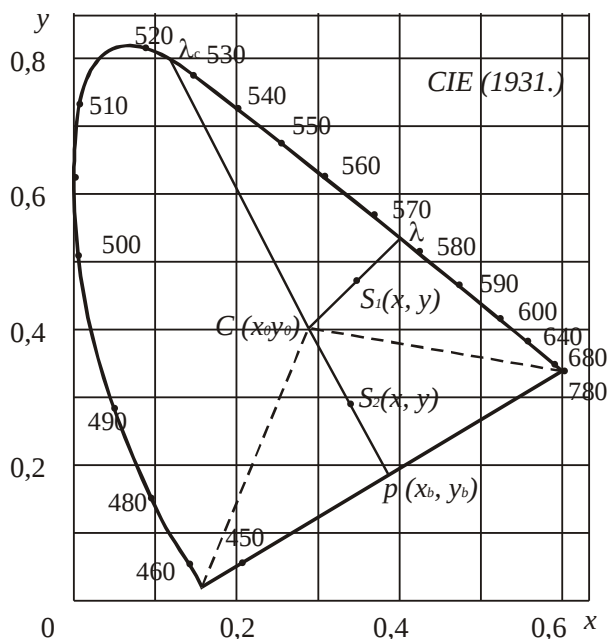
Наместо величина X, Y, Z , у стандардном систему се за спецификацију боја користи јединична равна, а пројекција спектралне криве у равни xy представља стандардни дијаграм боја (слика 18). У овом систему је, такође,

$$x + y + z = 1 \text{ и}$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}; \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (3.63)$$

У дијаграму боја, на слици 18 приказан је и графички начин одређивања доминантне таласне дужине и чистоте боје, као и значење ових величина.

Од тачке C , тј. референтне беле боје система, повући праву линију до тачке S_1 и продужити до спектралне криве. Таласна дужина λ , одређена пресеком праве са спектралном кривом, представља доминантну таласну дужину боје S_1 .



Слика 18. Стандардни дијаграм и графички начин одређивања доминантне таласне дужине и чистоте боје

Боје у троуглу које чине тачка C и тачке означене са таласном дужином 380 nm и 770 nm, називају се пурпурне. Ове боје немају доминантне таласне дужине. Дефинишу се комплементарном таласном дужином λ_c , која се налази повлачењем праве од пурпурне боје S_2 кроз C до спектралне криве.

Чистоћа p ма које боје (S_1 и S_2), одређује се помоћу једначине:

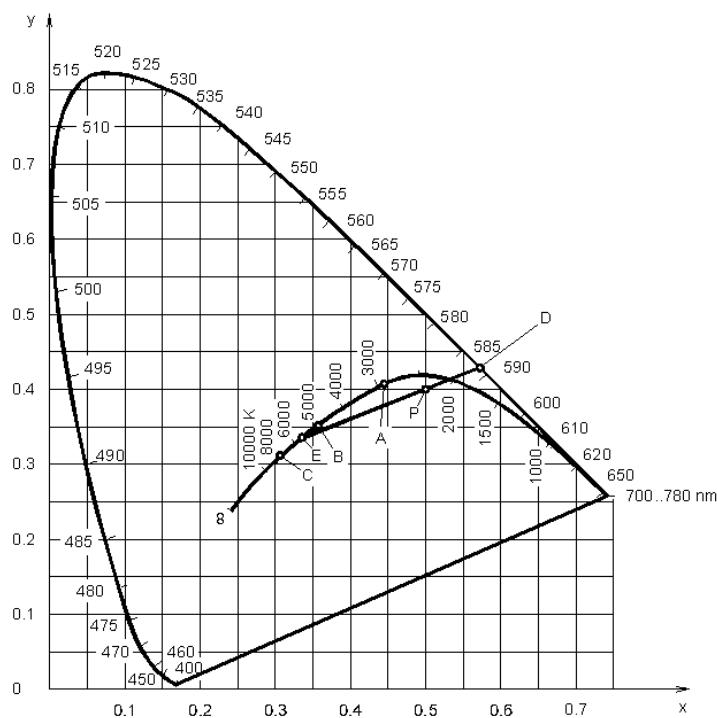
$$p = \frac{x - x_m}{x_b - x_m} = \frac{y - y_m}{y_b - y_m}. \quad (3.64)$$

Појам некомплементарне таласне дужине односи се на таласну дужину монохроматичног светлосног флуksа који, помешан у погодной пропорцији са светлосним флуksом неког другог извора, даје ахроматичну, тј. белу светлост. Уопште, ма које две светлости, или боје које у смеши стварају белу боју, називају се комплементарним бојама.

Планковом формулом:

$$M_{e\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}, \quad (3.65)$$

одређена је спектрална карактеристика црног тела у функцији температуре. Ако се за различите температуре израчунавају координате одговарајуће боје светлости, добија се крива у дијаграму боја, приказана на слици 19.



Слика 19. Планкова крива боја у функцији црног тела [1]

Појам температуре боје неког светлосног извора подразумева температуру на коју треба загрејати црно тело да би његова спектрална карактеристика одговарала карактеристици извора.

Појам температуре боје може се проширити и на све светлосне изворе, без обзира на њихове спектралне карактеристике, али чије се координате боје налазе на Планковој криви. Температура боје извора одређена је тада одговарајућом температуром црног тела.

За вештачке изворе дневне светлости, чије координате не леже на Планковој криви већ у близини криве, што је најчешћи случај, дефинише се корелациона температура. То је температура при којој је боја црног тела визуелно најсличнија боји извора, а одређена је пресеком Планкове криве са изометријском правом на којој се налазе координате боје светлосног извора.

При коришћењу температуре боје као мерила за упоређивање светлосних извора, потребно је водити рачуна и о спектралним карактеристикама. Ако су врло различите, као што су различите карактеристике флуоресцентне сијалице и сијалице са волфрамовим влакном, температура боје није мерило разлике у ефектима који се постижу при осветљавању објекта.

3.10. Дијаграми боја са равномерном размером

Психофизичке величине и колориметријски закони о којима је претходно било речи, односили су се на особину вида везану са идентификовањем светлосних извора који при одређеним условима гледања, стварају индентичан одзив визуелног система. У колориметрији као и у ТВ техници потребно је установити начин за идентификовање парова светлосних извора који при одређеним условима посматрања, стварају једнаку разлику одзива визуелног система. Овај проблем је везан са способношћу ока да процени мале или јасно запажене разлике у боји и сјајности.

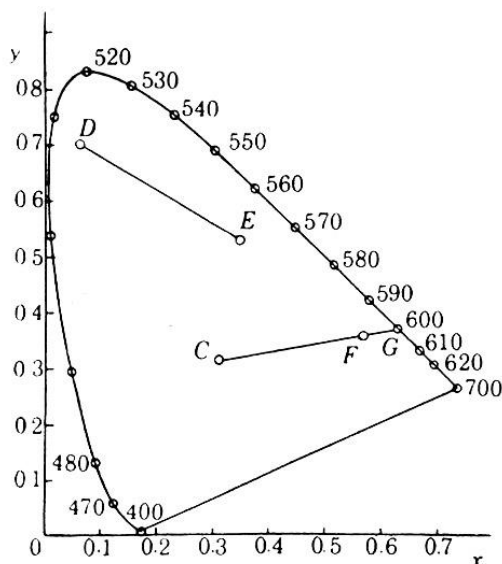
Обзиром да процену разлике врши посматрач на основу субјективног запажања, потребно је користити одговарајуће изразе за три параметра светлости. Психофизички изрази, доминантна таласна дужина, чистоћа и сјајност везани су са количинама које су добијене мерењем и које не зависе од адаптације ока.

Доминантна таласна дужина неке боје је таласна дужина на којој права која пролази од беле тачке и пролази кроз реперезентативну тачку дате боје сече спектралну криву. Доминантна таласна дужина боје F на слици 20 је 600 nm.

Не постоји јединствена дефиниција беле, ахроматичне светлости. Просечна дневна светлост, светлост Сунца или светлост неба, могу се сматрати "белим". У одсуству дефиниције говори се о осветљивачу C (просечна дневна светлост) као о белој, тј. ахроматичној светлости, а тачка C зове се "белом тачком".

Иако доминантна таласна дужина није исто што и осећај тона боје, она одговара тону боје који изазива. Слично, чистоћа боје одговара осећају засићености. Хроматичност, која обједињује карактеристике доминантне таласне дужине и чистоће одговара хроматизму који обједињује тон боје и засићеност.

Разлике боја се оцењују посматрањем два узорка један до другог. Са два пара узорака може се проценити релативна величина једне разлике у односу на другу.



Слика 20. Дијаграм хроматичности

Ова процена се заснива на субјективном утиску у току посматрања и зависи од низа фактора, као што су:

- адаптација ока,
- облик и димензије узорка,
- величина разлике између појединих параметара,
- број параметара који се мењају итд

I Равномерна размера еквивалентне сјајности – луминанције (L^*) у функцији фактора сјајности узорка – психометријска осветљеност

Процењивање разлике у светлини узорка при константним хроминентним параметрима, своди се на одређивање равномерне размере еквивалентне сјајности – луминанције (L^*) у функцији фактора сјајности узорка.

Према одлуци СIE од 1976. године, усвојено је да се као добра апроксимација за равномерну размеру светлине користи емпиријска формула:

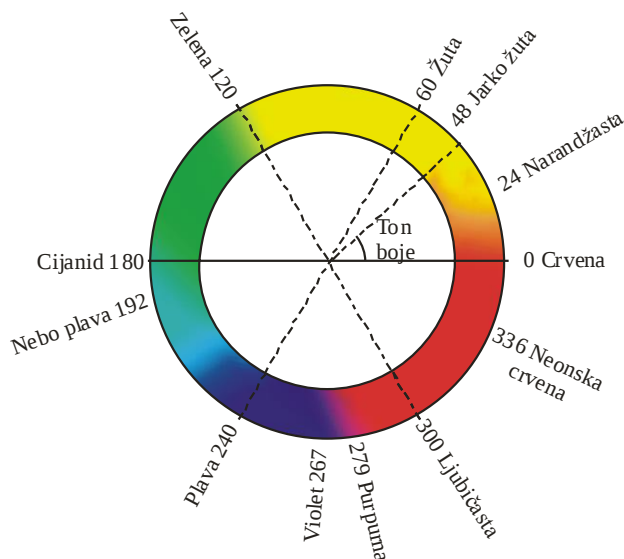
$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (3.66)$$

у границама $1 \leq Y \leq 100$, односно за $Y/Y_n > 0,01$ ($Y_n = 100$). У случају ахроматичне светлости, тј. беле боје, овим обрасцем је одређена скала сивог.

II Одређивање размере запажања разлике у засићењу, врсти боје

Процењивање разлике у засићењу, врсти боје, представља далеко сложенији проблем. Равномерна просторна представа боја, па према томе и равномерна размера хроминентних параметара светлости у равни константне светлине, могућа је у поларном или правоугаоном координатном систему. Један од таквих је и Манселов систем заснован на одређеној збирци узорака, при чему се поједини узорци константне

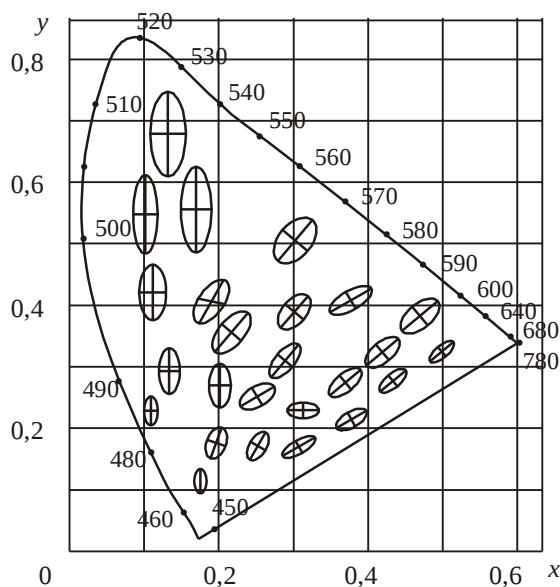
светлине сврставају у једну раван у којој су њихова засићења и врсте боја приказани поларним координатама (слика 21).



Слика 21. Поларни координатни систем [1]

У колориметрији, међутим, примењен је начин одређивања равномерне субјективне размере хроминентних параметара коришћењем трансформације координата боја XYZ система.

Циљ ове трансформације је да се коришћењем експерименталних података, као што су елипсе на слици 22, добије нови координатни систем у којем би два пара тачака једнаке међусобне удаљености одговарала координатама боја за које је експериментално утврђено да оку изгледају једнако различите.



Слика 22. Промена боја у ху – дијаграму које око осећа приближно једнако

Трансформација у општем облику дата је једнакостима:

$$x' = \frac{C_{11}X + C_{12}Y + C_{13}}{C_{31}X + C_{32}Y + C_{33}} \quad y' = \frac{C_{21}X + C_{22}Y + C_{23}}{C_{31}X + C_{32}Y + C_{33}}. \quad (3.67)$$

Из већег броја предложених трансформационих константи C_{ik} , од стране CIE, 1960. године, усвојена је трансформација:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}. \quad (3.68)$$

у којој су координате (x') и (y') замењене са (u) и (v) , а (z') са (w) .

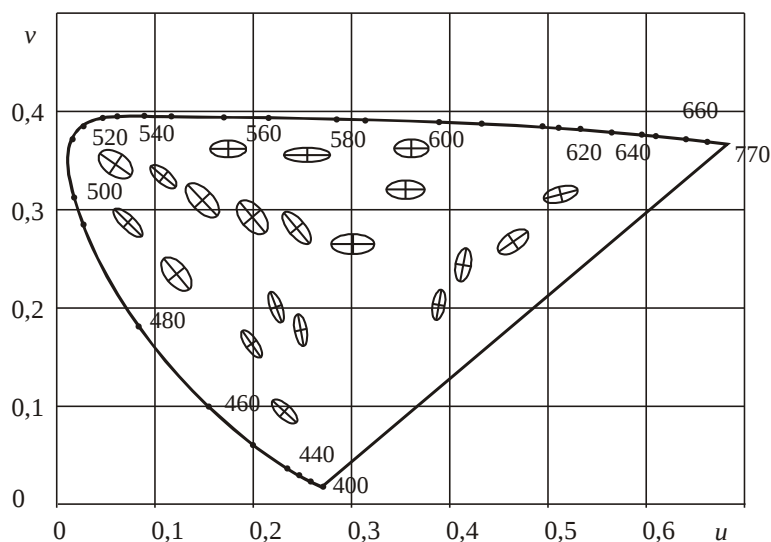
Осе овог координатног система су U , V , W , а одговарајући дијаграм боја назван је "дијаграм са равномерном размером" (Uniform Chromaticity Scale – UCS).

Координате (u, v) у функцији количина X , Y и Z , дате су једначинама:

$$u = \frac{U}{U + V + W} = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (3.69)$$

$$v = \frac{V}{U + V + W} = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z}.$$

На слици 23 на којој је приказан uv -дијаграм, однос дуже и краће осе елипсе са слике 22 је смањен, што значи да је размера uv -дијаграма приближнија равномерној размери.



Слика 23. Промена боја у uv – дијаграму

III Процена разлике светлине и разлике у врсти боје и засићењу

Проблеми везани са одређивањем разлике у визуелној перцепцији светлости често се односе истовремено и на процену разлике светлине и разлике у врсти боје и засићењу.

У ту сврху потребно је установити просторну равномерну размеру која обухвата размере дефинисане једначинама (3.66) и (3.68). У случају спецификације боја коришћењем скупа узорака, потребно је остварити тродимензионалну расподелу узорака у којој се сви сведени узорци визуелно једнако разликују.

СИЕ је 1964. године предложила примену тродимензионалног мерног система заснованог на UCS-дијаграму. Координатне осе овог система су U^* , V^* и W^* . За променљиву W^* коришћен је израз:

$$W^* = 25(Y)^{1/3} - 17(1 \leq Y \leq 100) \quad (3.70)$$

док су друге две променљиве одређене са:

$$\begin{aligned} U^* &= 13W^*(u - u_0) \\ V^* &= 13W^*(v - v_0) \end{aligned} \quad (3.71)$$

где су: u_0 и v_0 – координате референтне беле боје.

У пракси се показало да овај просторни систем знатно одступа од визуелне процене. Због тога је предложена и 1976. године од стране СИЕ прихваћена проста модификација система у којој је V^* - размера повећана за 50 %. Истовремено је за одређивање светлине усвојена једначина (3.66), у којој је извршена промена константи тако да је $L^* = 100$ када је $Y = Y_n$. На место U^* , V^* и W^* , за нови систем усвојене су координате L^* , u^* и v^* .

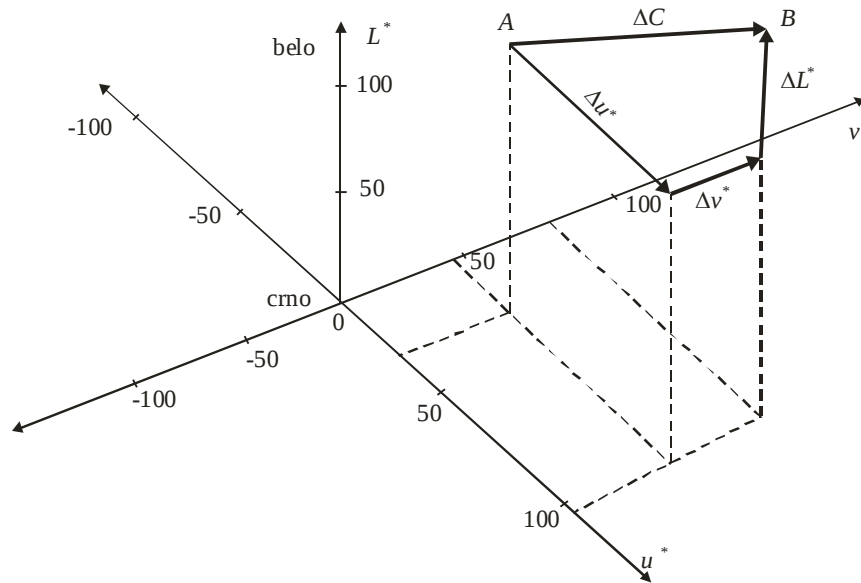
Нови систем је одређен са:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\ u^* &= 13L^*(u' - u'_0) \\ v^* &= 13L^*(v' - v'_0) \end{aligned} \quad (3.72)$$

где су:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} & v' &= \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} \\ u'_0 &= \frac{4X_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0} & v'_0 &= \frac{6Y_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0} \end{aligned} \quad (3.73)$$

Множењем разлике координата боја $(u' - u'_0)$ и $(v' - v'_0)$ са L^* теже се уочавају разлике у боји и засићењу када се смањује светлина узорака, а множењем са константом 13 усклађена је размера на осама u^* и v^* у односу на размеру осе L^* .



Слика 24. Просторни дијаграм са равномерном размером L^* , u^* , v^*

У просторном дијаграму са равномерном размером, укупна визуелна разлика ΔC одређена је удаљеношћу тачака A и B које представљају две посматране боје. Ако су компоненте разлика ових боја дуж појединих оса једнаке ΔL^* , Δu^* и Δv^* , тада је:

$$\Delta C = \left[\Delta L^{*2} + \Delta u^{*2} + \Delta v^{*2} \right]^{1/2} \quad (3.74)$$

3.11. CIELAB систем

CIELAB тродимензионални просторни систем је 1976. године дефинисао Интернационални комитет за осветљавање (CIE). Помоћу овог система, боја се изражава преко три нумеричке вредности:

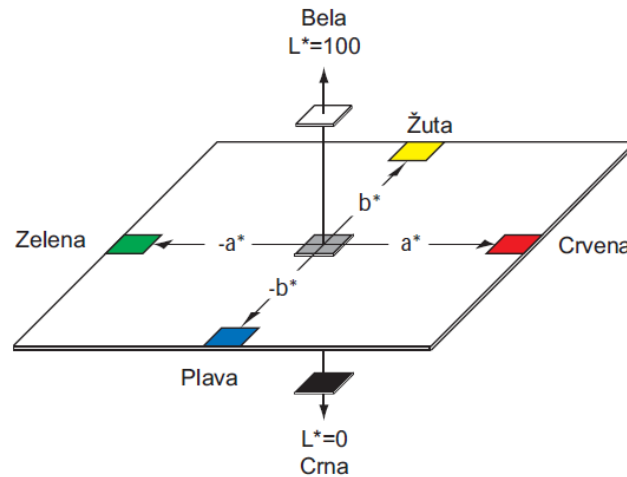
- L^* представља осветљај,
- a^* представља разлику зелено/црвено,
- b^* представља разлику плаво/жуто.

CIELAB је дизајниран тако да буде најближи визуелној перцепцији човека, тако да иста промена нумеричких вредности $L^*a^*b^*$ приближно одговара истој количини визуелне промене. XYZ систем није униформан – једнаке промене вредности производе неједнаке перцептуалне разлике у боји. Конверзија CIELAB–CIEXYZ се може извести на следећи начин:

$$\begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 & X/X_0 > 0,008856 \\ a^* &= 500 \left[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3} \right] & Y/Y_0 > 0,008856 \\ b^* &= 200 \left[(X/X_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3} \right] & Z/Z_0 > 0,008856 \end{aligned} \quad (3.75)$$

где су: X_0 , Y_0 , Z_0 – количине референтне беле боје [1].

Вредност осветљаја, L^* на вертикалној оси се креће у границама од $L^* = 0$ за најтамније црно до $L^* = 100$ за најсветлије бело. a^* оса представља зелено-црвену компоненту, са зеленим у негативном смеру и црвеним у позитивном смеру. b^* оса представља плаво-жуто компоненту, са плавим у негативном смеру и жутом у позитивном смеру. Осе боја a^* и b^* за вредности $a^* = 0$ и $b^* = 0$ представљају вредности неутралних сивих.



Слика 25. CIELAB систем боја

CIELAB систем је независан од уређаја и има довољно добру униформност да се може користити за дефинисање разлике између боја. Управо ово својство је од изузетне важности за одређивање разлика, односно степена поклапања нијанси каросерије аутомобила и његових пластичних компонената.

4. ПРОИЗВОДЊА И БОЈЕЊЕ ПЛАСТИЧНИХ КОМПОНЕНАТА У АУТОМОБИЛСКОЈ ИНДУСТРИЈИ

Компанија *FCA Srbija d.o.o. Kragujevac* основана је 2008. године као заједнички пројекат компаније *FIAT Group Automobiles (FGA)* и Владе Републике Србије, при чему *FIAT* поседује 67, а Република Србија 33 одсто власништва.

Нова фабрика *FCA Srbija d.o.o.* у Крагујевцу свечано је отворена у априлу 2012. године и данас је то један од најмодернијих производних погона у оквиру *FIAT Chrysler Automobiles* групе широм света. У овај производни погон је уложено 850 милиона евра ради набавке најсавременије опреме.[10]

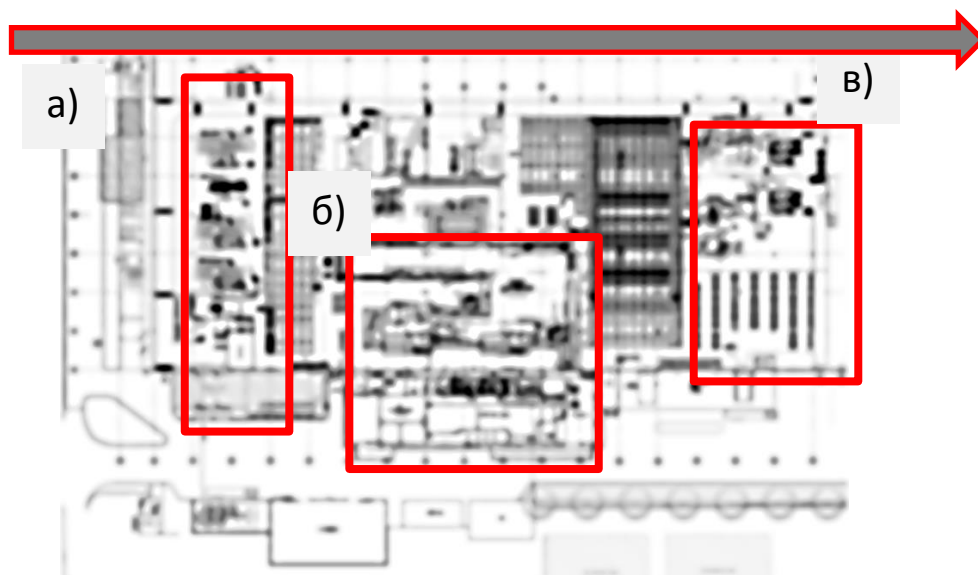
Године 2012. је почела производња потпуно новог модела, 500L. Средином 2017. тржишту је приказана рестилизована верзија, која се и данас производи.



Слика 26. Рестилизована верзија модела 500л

У оквиру компаније *FCA Srbija* налази се производна јединица *Plastic Shop*, која се бави израдом готових браника за модел *FIAT 500L*. Сада, у 2018. години се производи 2 различита модела предњих браника и 3 различита модела задњих браника у 12 различитих боја. Производна јединица се састоји из 3 целине, и то:

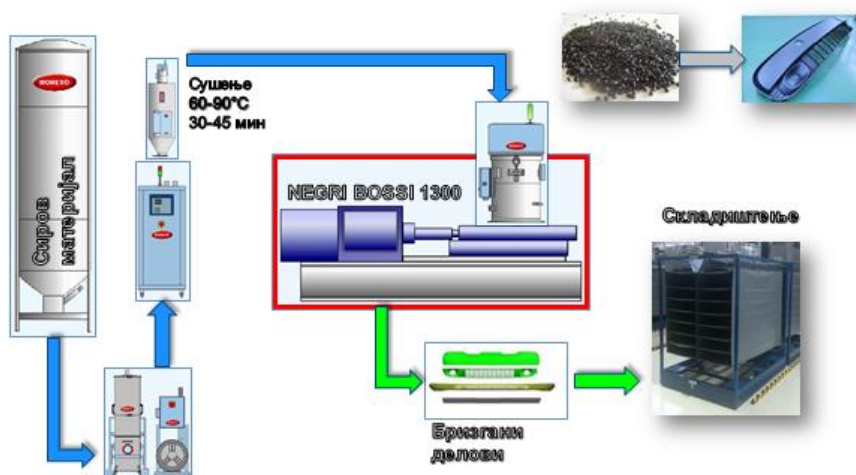
- Бризгање браника и његових компонената,
- Бојење браника и компонената и
- Монтажа браника.



Слика 27. Шематски приказ производне јединице Plastic Shop – а) бризгање, б) бојење, в) монтажа

4.1. Опрема за бризгање

Бризгање браника и компонента се врши на укупно 5 преса за бризгање, од чега су две пресе ENGEL 3200 тона са роботизованим вађењем комада помоћу шестоосних KUKA робота, једна преса ENGEL 2700 тона са роботизованим вађењем комада помоћу линеарног, троосног робота, једна преса NEGRI BOSSI 1300 тона са роботизованим вађењем комада помоћу линеарног, троосног робота, као и једна преса MIR 280 тона за бризгање ситнијих компонената. Поред преса, сектор бризгања поседује и аутоматски систем MORETO за складиштење, сушење, дистрибуцију и дозирање пластичних маса у облику гранулата.



Слика 28. Шематски приказ тока материјала на преси 1300 тона

Алати за бризгање (калупи) су у зависности од компоненте која се помоћу њих бризга од 100 kg до 40 тона тежине. Готово сви алати поседују водено хлађење/грејање и

хидраулично отварање појединих зона и избијача који омогућавају лакше вађење компонената које су великих површина и сложених геометрија.

4.2. Процес монтаже

Монтажа се састоји из две линије: линија монтаже предњих браника и линија монтаже задњих браника. Начини спајања се разликују од компоненте до компоненте.

Спајање завртњевима се врши помоћу уређаја за завијање који поседују контролу обртног момента, угла завијања и броја завртњева, чиме се обезбеђује тражени квалитет и поновљивост оваквог вида монтаже. Овим уређајима се искључује могућност настанка људске грешке, јер машина не дозвољава узимање браника док сви наведени услови не буду испуњени. Као резултат успешно обављеног процеса, машина која помоћу PLC-а комуницира са уређајем за завијање, отпушта вакуумске и механичке држаче и издаје штампану налепницу, чиме је браник спреман за прелазак на следећу станицу.

Спајање пластичних компонената се врши и помоћу ултразвука. Генератори високих фреквенција помоћу сонотрода стварају високофреквентне вибрације помоћу којих се спајају два пластична дела. Главни параметри ових машина су растојање сонотроде, амплитуда генератора, фреквенција (до 20.000 Hz), снага (100 до 200 W).



Слика 29. Изглед роботизоване машине за спајање лепљењем

Још једна од технологија спајања пластичних компонената је лепљење. Лепљење се врши између браника и носача позиционих светала, а реализује се помоћу SIKA лепка и аутоматске, роботизоване машине. Машина се састоји од гнезда за полагање браника, два гнезда за носаче позиционих светала која се налазе на вертикалним, линеарним вођицама, шестоосног COMAU робота и NORDSON система за топљење и дистрибуцију лепка. Главни параметри овог процеса су брзина истицања лепка кроз дизну на врху робота и брзина кретања робота у радном делу путање, што је у

директној вези са количином лепка (16 грама по бранику). Битан параметар је и температура лепка (185°C на излазу дизне). Поновљивост процеса се контролише дневним мерењем избачене количине лепка на дизни и тестовима на кидање спојених делова при чему се региструје сила кидања.

Технологија која је од недавно у поседу Plastic Shop производне јединице је Hot stamping технологија која представља процес наношења веома танких фолија на пластичне компоненте у циљу побољшања естетских особина делова, конкретно, добијања ефекта хромираних детаља. Машина за овакав процес се састоји од грејача на коме постоје силиконски уметци који врше притисак фолије на комад (температура грејача је 225 степени), јонизатора ваздуха у зони процеса, система за разматавање фолије, три гнезда при чему свако гнездо представља по једну трећину ослоња за исту компоненту (предњу маску хладњака). Разлог троделног гнезда је ограничење примене овакве врсте технологије на велике, 3D контуре, па се она ради парцијално.

4.3. Процес бојења пластичних компонената

Лакирница у производној једини Plastic Shop је пројекат немачке компаније EISENMANN, која је уједно и главни извођач радова. Лакирница се састоји из 3 нивоа. Први ниво се састоји из:

- станица за улагање и излагање браника
- просторија за припрему и система за дистрибуцију боје,
- постројења за аутоматско прање браника и компонената водом и хемикалијом под притиском,
- постројења за издувавање воде након прања,
- јединица за припрему, пречишћавање и циркулацију ваздуха,
- постројења за пречишћавање воде из водених завеса,
- система за грејање/хлађење боје,
- транспортног постројења (конвејера).

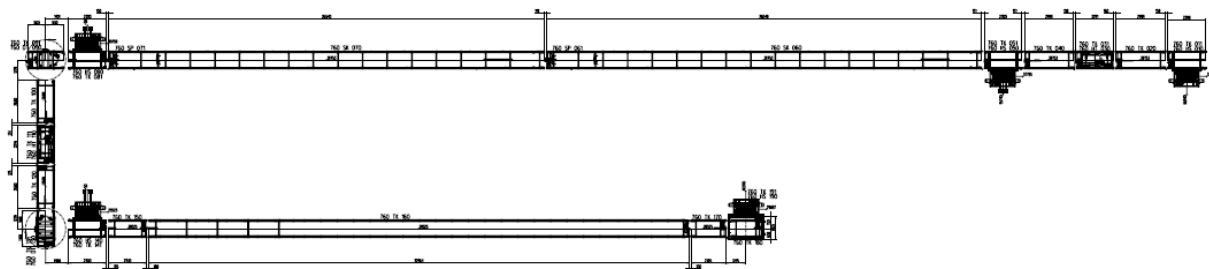
Други ниво лакирнице се састоји из:

- зоне хлађења браника и компонената након сушења воде,
- роботизоване кабине за пламеновање браника и компонената,
- просторије за контролу пламеновања,
- роботизоване кабине за наношење примарног слоја боје,
- зоне делимичног сушења примарног слоја,
- роботизоване кабине за наношење основне боје,
- зоне делимичног сушења основне боје,
- роботизоване кабине за наношење лака,
- зоне делимичног сушења лака,
- зоне хлађења након сушења лака,
- зоне акумулирања носача браника и компонената (бафера),
- “чисте собе” из које се контролише процес,
- транспортног постројења (конвејера).

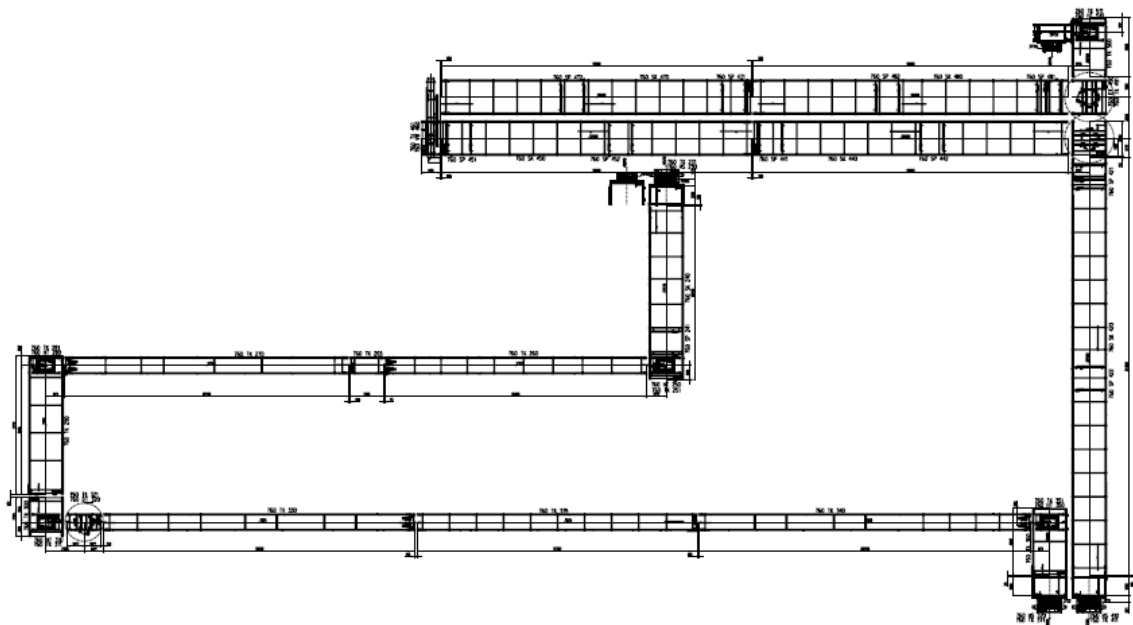
Трећи ниво лакирнице састоји се од:

- прве сушаре за сушење браника и компонената након прања,
- друге сушаре за сушење лака на браницима и компонентама,
- транспортног постројења (конвејера).

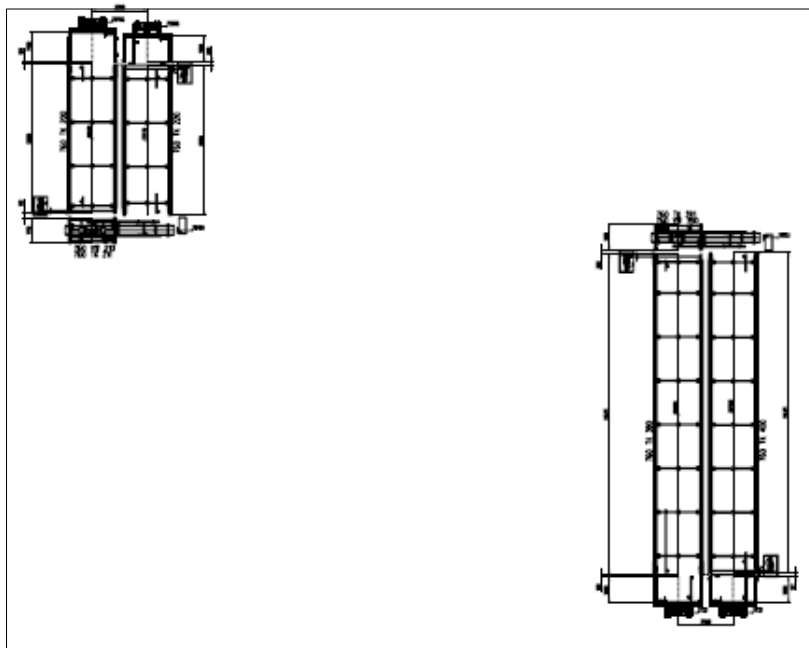
Сва три нивоа су међусобно повезана аутоматским транспортним (конвејер) системом који се састоји од мноштва транспортних, ланчастих трака, преносних и подизних станица, окретних столова и лифтова који међусобно комуницирају помоћу различитих сензора повезаних на PLC јединице.



Слика 30. Шема транспортног система првог нивоа



Слика 31. Шема транспортног система другог нивоа (висина 4800 mm)

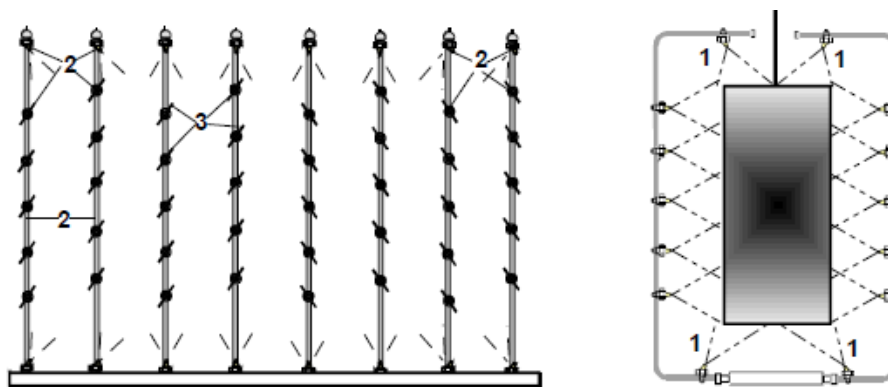


Слика 32. Шема транспортног система трећег нивоа (висина 8900 mm)

Процес отпочиње тако што оператер на станици за улагање поставља одговарајућу комбинацију предњег и задњег браника на носач и задаје одговарајући код који представља модел и боју пара браника. Сваки носач се састоји из три дела: главног носача на коме се налазе измењиви носачи за предњи и задњи браник засебно. На подножју главног носача се налази RFID плочица која носи податке о задатим кодовима модела и боје. Притиском на тастер оператер отпушта носач чиме започиње потпуно аутоматизован циклус припреме и бојења у трајању од 3,5 часа, све до изласка обојеног пара браника на станици излагања.

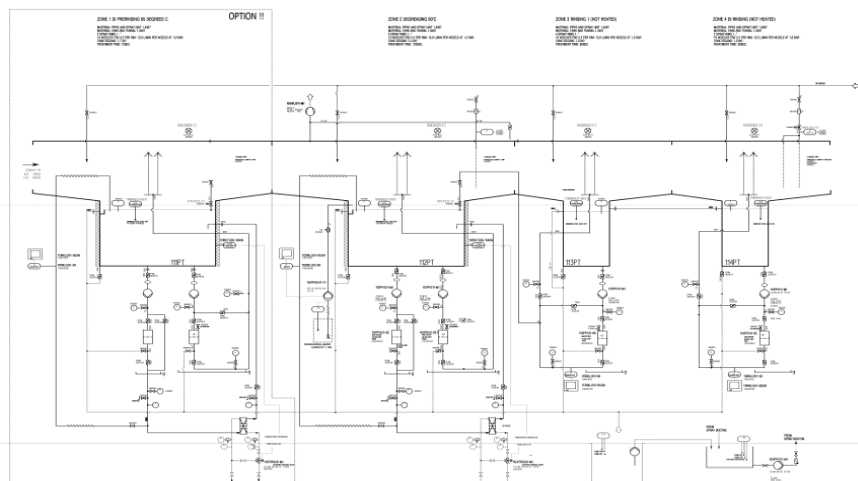
4.4. Припрема компонената прањем и одмашћивањем

Прва станица је тзв. Power wash station, односно постројење за прање браника деминерализованом водом и хемикалијом под притиском. Постојење се састоји од три зоне прања. Свака зона поседује засебан танк са раствором кога чине деминерализована вода и одређени проценат хемикалије. Раствор се помоћу пумпи шаље у вертикално постављене млазнице из којих под притиском од 2 бара излази раствор у облику лепеза. Млазнице су тако распоређене да се лепезе не преклапају и нападају целокупну површину браника са предње, задње, горње и доње стране, што се обезбеђује заокретањем лепеза млазница под углом од 10 степени у односу на вертикалу. Крајње млазнице се закрећу ка унутра под углом од 30 степени ради смањења мешања раствора између зона. Раствор у првој зони се помоћу додатне пумпе и измењивача топлоте греје на 50°C. Температура воде на улазу у измењивач је 120°C. Раствор у остале две зоне је на око 20°C. Свака зона има врећасте филтере за пречишћавање раствора, а микронажа филтера зависи од зоне: прва зона 50 μm , друга зона 10 μm и трећа 5 μm , што практично значи да је трећа зона најчистија, тј. зона испирања. Филтери се мењају када разлика притисака између одлазног и долазног вода пређе 1 бар. Након треће зоне постоји још један, последњи ред млазница са чистом, деминерализованом водом.



Слика 33. Шема млазница: 1-млазнице нападају носач са компонента са свих страна, 2-подешавање крајњих млазница ка унутра, 3-подешавање млазница ради смањења преклапања

Хемикалија за прање и одмашћивање је произвођача HENKEL, Bonderite C-AK 2670 IT, и дозира се у систем аутоматски помоћу пумпе за дозирање. Дозирање хемикалије се врши на основу сигнала који шаље мерач кондуктивности (специфичне електричне проводности). Кондуктивност раствора је на тај начин увек константна, према задатим вредностима. Хемикалија се дозира само у први танк, а раствор се кретањем носача браника помоћу аутоматског конвејер система преноси у остале танкове. У другом и трећем танку кондуктивност се смањује аутоматским дозирањем чисте воде, а опет на основу вредности са мерача кондуктивности. Уколико је вредност кондуктивности у другом и трећем танку превисока, или пак прениска, то је знак да млазнице унутар постројења нису правилно окренуте.

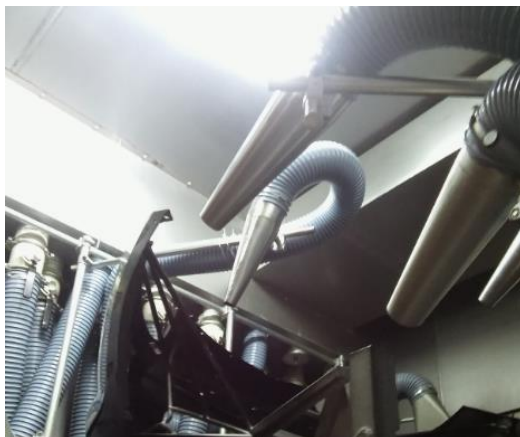


Слика 34. Шема постројења за прање

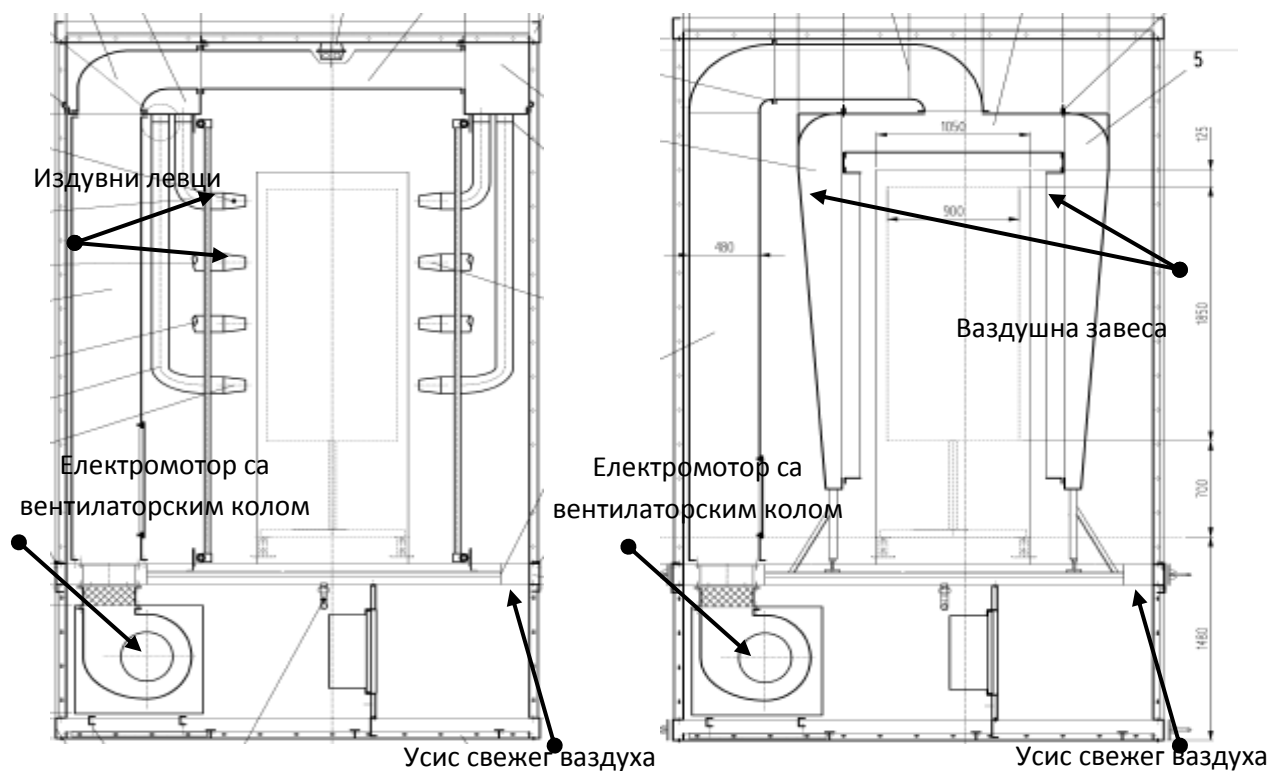
4.5. Сушење компонента издувавањем и загревањем

Након прања, компоненте се суше струјом ваздуха у зони издувавања воде. У четири вертикална реда налазе се издувни левци који струјом ваздуха односе капљице воде са браника, дувајући са предње и задње стране браника. Након њих следи ваздушна завеса. Ваздушни левци се могу подешавати за оптимално одношење капљица воде након прања. Заостале капљице се након бојења не могу дорадити. Левци и завеса се

напајају ваздухом помоћу три електро мотора укупне снаге 55,5 kW (3 x 18,5 kW) са вентилаторским колима. Брзина струјања ваздуха износи приближно 110 m/s.



Слика 35. Изглед левака за сушење струјом ваздуха



Слика 36. Зона сушења издувавањем: а) издувни левци, б) ваздушна завеса

Носач са браницама се, након сушења, помоћу лифта у оквиру аутоматског транспортног постројења подиже на трећи ниво, тј. прву сушару која има функцију сушења заостале воде након издувавања. У сушари сваки носач проведе 20 минута на 85°C. Загревање ваздуха се врши помоћу WEISHAUPТ спаљивача, природним гасом.



Слика 37. Изглед спаљивача за загревање сушаре спаљивањем природног гаса

По завршетку овог циклуса, носач се лифтом спушта на ниво 2, где прво пролази кроз зону хлађења након сушења. Температура у овој зони износи 20°C и аутоматски се регулише.

4.6. Роботизовано пламеновање

Браници се излажу пламеновању, тј. утицању на површински напон ради бољег пријањања примарне боје. Уколико би се овај процес прескочио, тестови адхезије би били негативни и такав браник се не би смео уградити на аутомобил. Пламеновање се врши роботизовано, шестоосним роботом јапанског произвођача YASKAWA опремљеног брениером за пламеновање и гасном инсталацијом. Удаљеност брениера од површине компоненте износи од 50-80 mm. На брениеру сагорева смеша природног гаса и кисеоника. Квалитет овог процеса се контролише посебним мастилом које се наноси на површину третиране компоненте четкицом у облику танког филма. Захтев је да се филм задржи дуже од 5 секунди у непрекидној форми, без груписања у капљице.

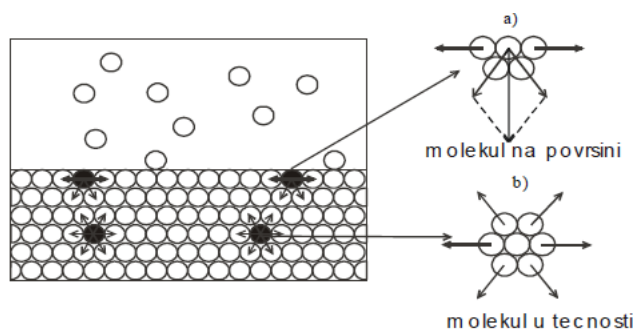


Слика 38. Мастило за проверу квалитета пламеновања

Употребом овог мастила заправо се контролише површински напон, а ознака на бочици показује вредност у јединицама dyne/cm:

$$1 \text{ dyne} = 10^{-5} \text{ N}$$

$$1 \text{ dyne} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm/s}^2$$



Слика 39. Приказ међумолекуларних сила: а) молекул на површини, б) молекул у унутрашњости



Слика 40. Пример успешног пламеновања

4.7. Роботизовано бојење

Бојење браника и компонената се врши у три кабине за бојење:

- кабина за наношење примарне боје - PRIMER кабина,
- кабина за наношење боје - BC (Base Coat) кабина,
- кабина за наношење лака - CC (Clear Coat) кабина.

Све кабине су опремљене подовима и зидовима са тзв. воденим завесама како би се прикупио вишак боје из процеса бојења (over spray). Вода помоћу пумпи које се налазе на првом нивоу циркулише из танкова (свака кабина има засебан танк), а посебном пумпом се одваја део протока у сваком тренутку и шаље у систем за одвајање муља и његово одстрањивање. Ово се постиже захваљујући употреби комбинације 6 различитих врста хемикалија произвођача NALCO, које се помоћу GRUNDFOS прецизних пумпи дозирају у контаминирану воду у одређено време и на одређено место у систему.



Слика 41. GRUNDFOS дигитална, дозирна пумпа

Важни параметри који се током процеса у кабини строго морају контролисати су:

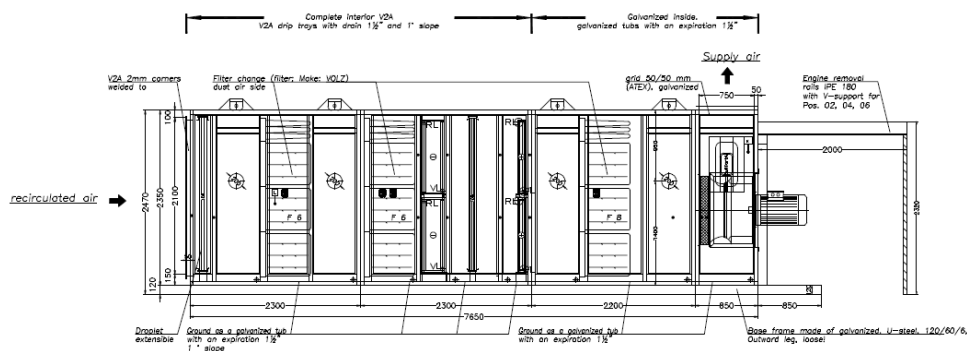
- влажност ваздуха у кабини, ($60 \pm 5 \%$),
- брзина струјања ваздуха, ($0,3 - 0,4 \text{ m/s}$),
- температура унутар кабине ($24 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$).

Ови параметри су аутоматски регулисани на основу заданих вредности у PLC-у и информација са системских сензора унутар саме кабине. Струјање ваздуха је од плафона ка поду, што значи да се брзина струјања мери само у вертикалном правцу, а да је у хоризонталном она скоро једнака нули. Припрема ваздуха се врши у јединицама на првом нивоу, где вентилаторска кола за циркулацију покрећу мотори од 75 kW.



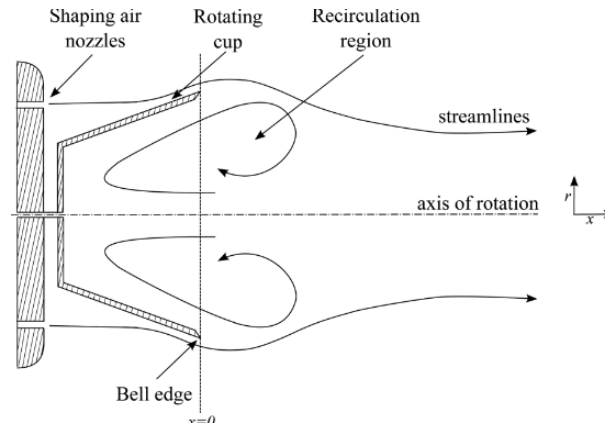
Слика 42. Изглед јединице за припрему ваздуха

У оквиру јединице за припрему, ваздух пролази кроз 3 нивоа филтрације, решеткасту баријеру која има функцију сепаратора капљица, као и саћасту структуру измењивача за топлу и хладну воду посебно. Измењивачи топлоте греју, односно хладе ваздух како би се у кабини обезбедила жељена температура. Измењивачима топлоте аутоматски управљају серво хидраулични вентили, који на основу сигнала отварају или затварају улаз топле, односно хладне воде. На крају, ваздух пролази кроз још један ниво филтрације који се налази на самом плафону кабине. Филтери се мењају на основу вредности диференцијалног притиска који се прати помоћу мерача који алармирају када притисак достигне критичну вредност, а након прекорачења одређене вредности шаљу сигнал за гашење појединих зона постројења.



Слика 43. Шема јединице за припрему ваздуха – део филтрације, грејања и хлађења, електромотор са вентилаторским колом

У PRIMER кабини се, након пламеновања, на бранике врши наношење примарне боје помоћу шестоосног робота YASKAWA EPX 2900 опремљеног SAMES апликацијом за аутоматско бојење. Примарна боја, тзв. прајмер, је на излазу из робота заправо мешавина боје и катализатора (учвршћивача) са уделом катализатора од 11%. Наношење боје се врши помоћу звона које је помоћу магнета причвршћено за турбину и које ротира брзином од 0 - 70.000 o/min, и ваздуха који излази из атоизера на носачу звона (тзв Shaping Air) који се може регулисати у распону од 0-1000 l/min.



Слика 44. Шематски приказ кретања ваздуха преко звона



Слика 45. Ротирајући атоизер на врху шесте осе робота

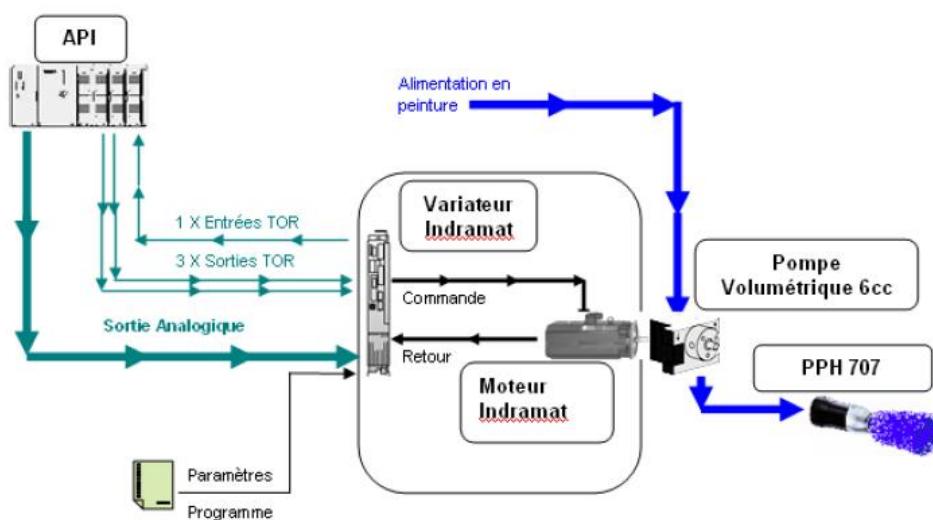


Слика 46. Ротирајући атоизер, постављање и скидање магнетног звона



Слика 47. Изглед турбине за ротацију звона и компонента атоизера

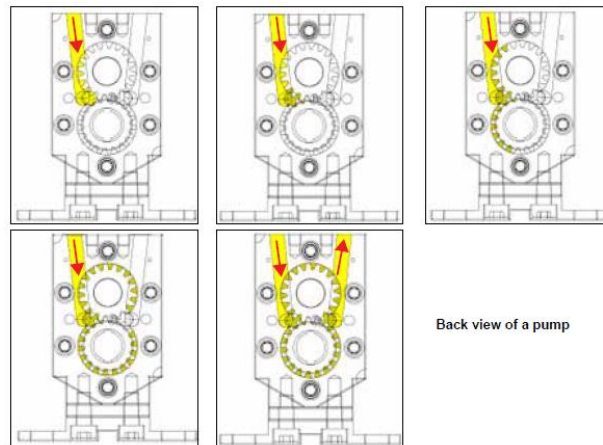
На тај начин се врши атомизација боје. Боја излази из унутрашњег дела звона. Поред поменутог, важни параметри су брзина кретања робота у одређеним зонама као и преклапање између пролаза, што је дефинисано програмом путање робота, затим количина избачене боје у јединици времена (0-700 ml/min). Управљање количином избачене боје се изводи помоћу зупчасте пумпе погоњене серво мотором. Оно што је такође дефинисано програмом је и време укључивања, односно искључивања спреја.



Слика 48. Блок дијаграм регулације количине боје

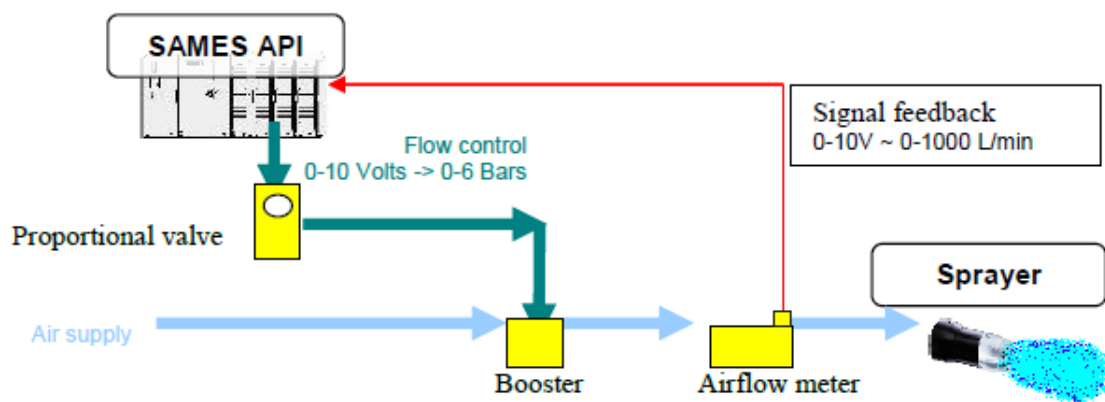


Слика 49. Изглед зупчасте серво пумпе за боју и разређиваче

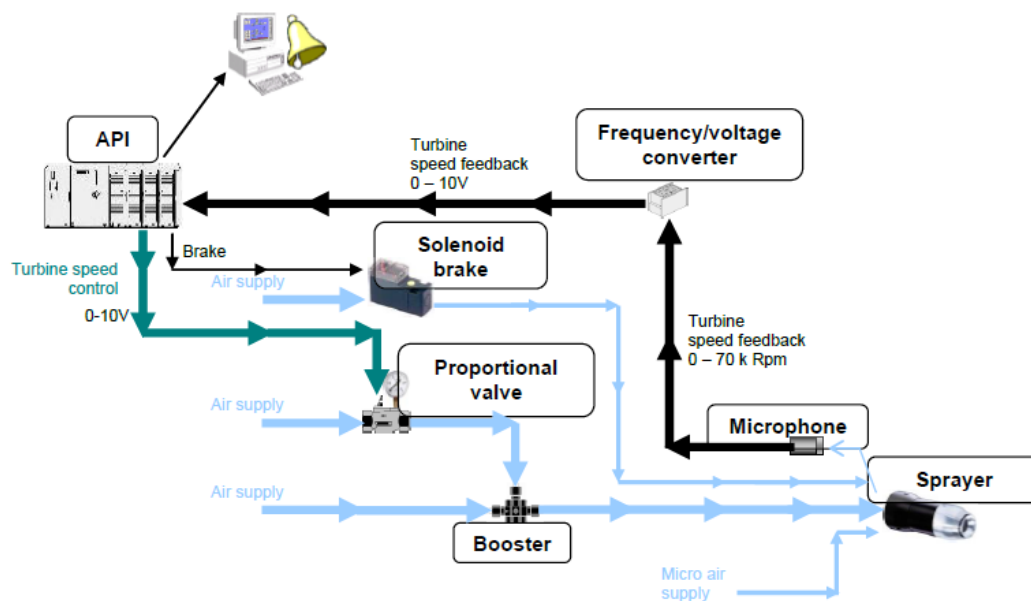


Back view of a pump

Слика 50. Шематски приказ циклуса пумпе



Слика 51. Блок дијаграм контроле ваздуха за атомизацију



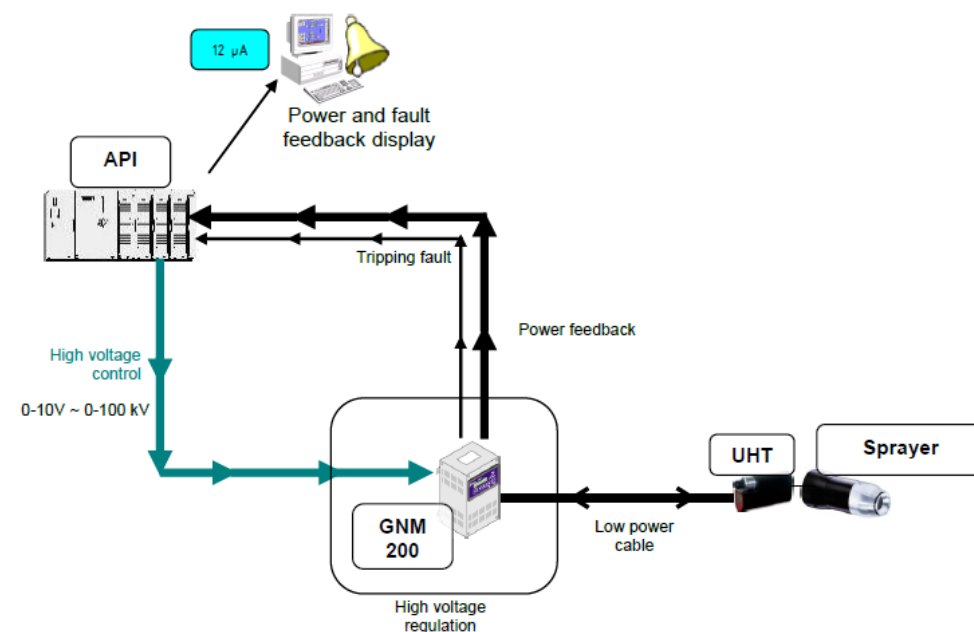
Слика 52. Блок дијаграм контроле ротирања звона (турбине)

Након примарне боје наноси се основна боја (Base Coat), и то помоћу два робота. Носач са компонентама се све време креће кроз кабину константном брзином, а робот помоћу опције синхронизације путање са конвејером прати носач и фарба компоненте у току кретања.



Слика 53. Изглед ВС кабине

Први робот наноси боју такође помоћу звона, али за разлику од робота који наноси примарну боју, овај робот поседује јединицу за наелектрисање боје. Овим се омогућава боље пријањање боје на компоненту, као и мање расипање боје (over spray). Вредност јединице за наелектрисање је параметар који је променљив и може се подесити у вредностима од 0 до 100 kV.



Слика 54. Блок дијаграм регулације јединице за наелектрисање

Промена боје у роботу се врши аутоматски, на основу задатог кода на станици улагања који у себи носи RFID плочица. Свих 12 линија боје циркулише кроз острво вентила у роботу. На основу сигнала аутоматски се отварају пнеуматски вентили који шаљу пилот ваздух ка жељеном вентилу на острву који даље пропушта боју ка атомизеру. На острву се такође налазе и вентили линије разређивача који по унапред дефинисаним секвенцама испирају систем аутоматски при промени боје. Приликом испирања, робот аутоматски долази у позицију за испирање. Отпадни разређивач се одводи посебним системом и шаље ван лакирнице у танк за колектовање овакве врсте отпада.



Слика 55. Острво вентила

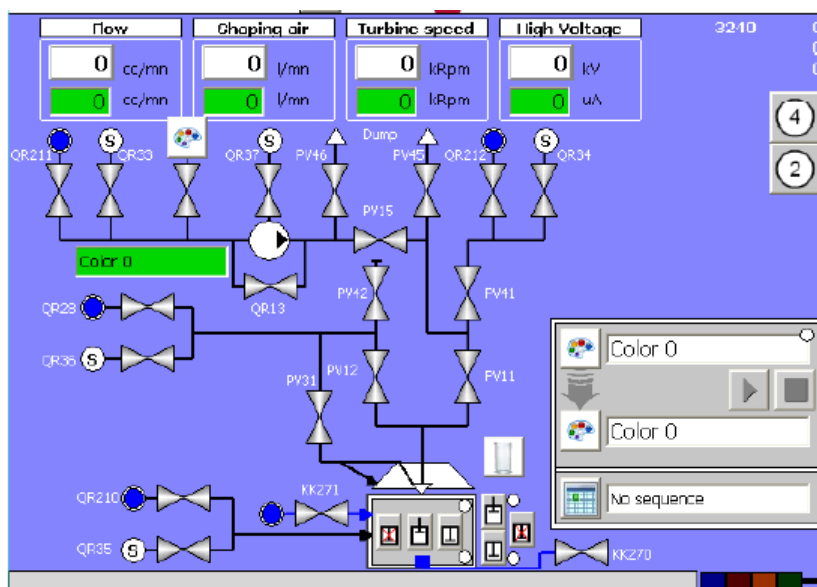
Други робот за наношење основне боје није са ротирајућим атомизером, него се боја наноси помоћу пиштоља.



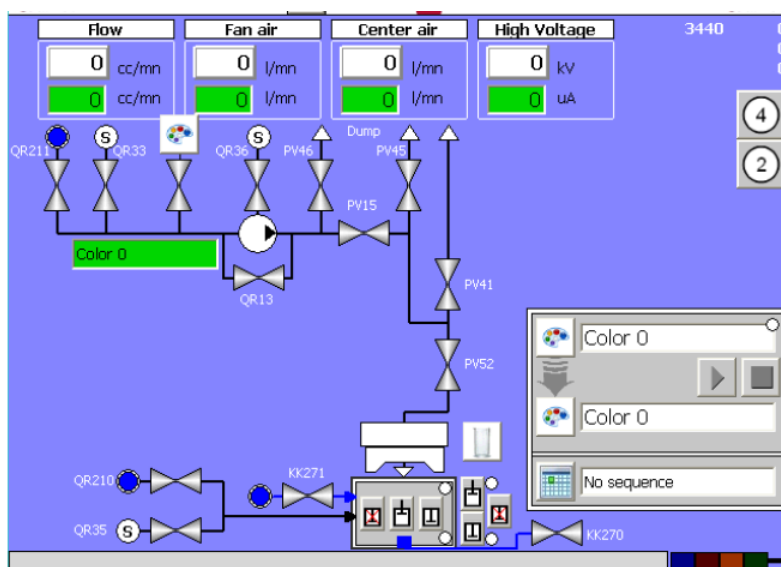
Слика 56. Пиштољ за роботизовано наношење боје

Основни параметри овакве врсте наношења боје су количина боје у ml/min, наелектрисање у kV, количина ваздуха којом се регулише ширина лепезе и количина ваздуха којом се регулише јачина удара боје у површину бојене компоненте у l/min.

Све описане параметре је могуће пратити на панелу који се налази испред сваке кабине.



Слика 57. Изглед панела са прозором за праћење параметара првог робота за наношење основне боје



Слика 58. Изглед панела са прозором за праћење параметара другог робота за наношење основне боје

Боја се из просторија за припрему цевоводима допрема до робота помоћу циркулационих пумпи које су електрично гоњене, а флуид потискују наспрамно позициониран клипови. Притисак на одлазном воду се регулационим вентилима подешава на 7 бари, а на повратном воду на 5 бари. Просторија са танковима за припрему боје се строго држи на константној температури од 22 °C помоћу система два измењивача, за топлу и хладну воду, којима се аутоматски управља помоћу серво вентила и информација које дају сензори температуре. Овај систем уједно служи и за вентилацију поменуте просторије. Поред строге контроле температуре у просторији за припрему и складиштење боја, контролише се и температура боје током њеног транспорта цевоводима до робота. Ово се врши помоћу система “цев у цеви”, где кроз унутрашњу цев пуутује боја, а око ње, унутар спољашње цеви струји вода која

греје/хлади боју, по потреби. Ово се обезбеђује опет преко посебних измењивача за топлу и хладну воду, давача температуре и трокраких серво вентила који по потреби мешају топлу и хладну воду и на тај начин одржавају константну температуру боје.



Слика 59. Део система за контролу температуре боје

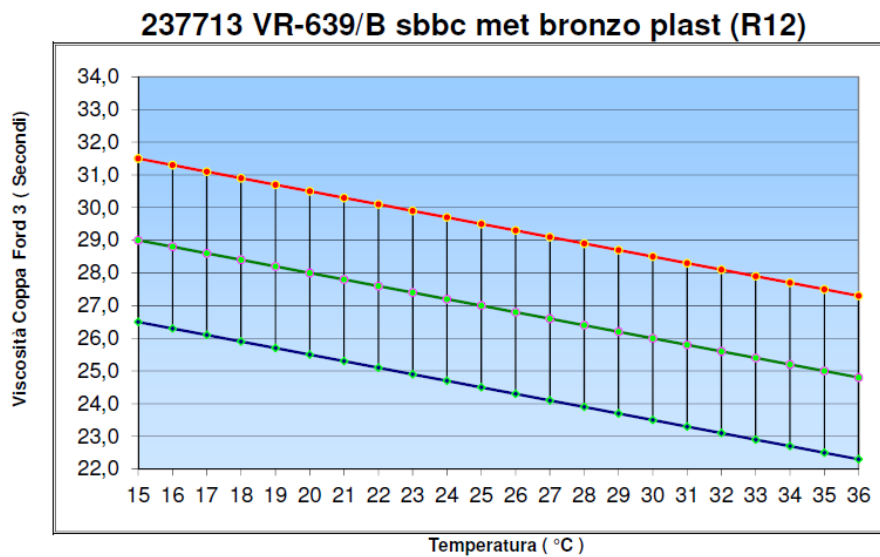
Поред температуре боје, други важан параметар боје је њена вискозност. Боја од добављача стиже у неразређеном стању, и углавном се разређује са око 20% разређивача. Након разређења, контролише се вискозност боје помоћу FORD CUP мензура. Неопходно је да боја из мензуре истече за одређено време које је прописано од стране произвођача боје.



Слика 60. FORD CUP за мерење вискозности боје; приказ поступка мерења

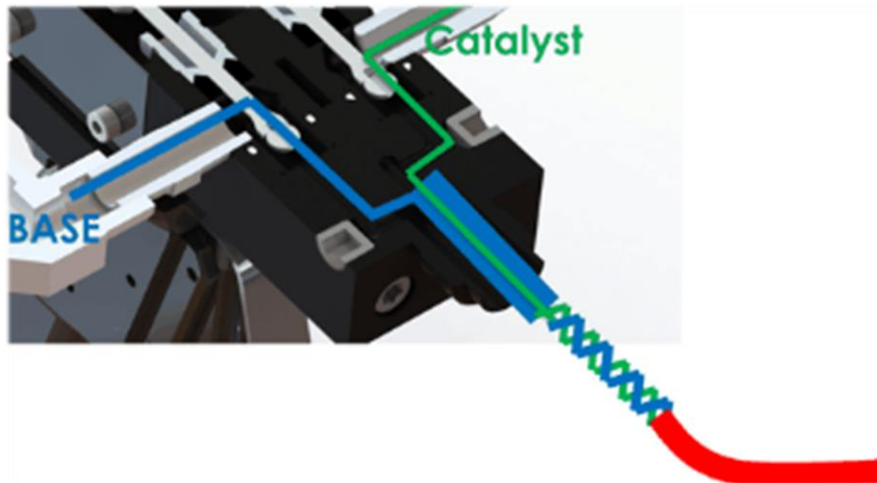
Дијаграм зависности поменутог времена и температуре боје са толеранцијама је приказан на следећој слици. Идеалан случај је вредност вискозности подесити на такав

начин да тачка пресека температуре и времена на дијаграму буде у средини толерантног поља, на зеленој линији.



Слика 61. Дијаграм вискозност-температура за металик бронзану боју

Последња роботизована кабина је Clear Coat кабина за наношење слоја лака. Лак наносе два робота, један за другим, у односу 50% дебљине слоја сваки робот. Лак се наноси у дебљини од приближно 40 μm . Оба робота функционишу по принципу електростатичке атомизације боје, помоћу звона, идентично роботу за наношење првог слоја основне боје. Лак се наноси као двокомпонентна смеша лака и катализатора са уделом катализатора од 33%. Лак и катализатор се посебним водовима доводе до роботске главе и у њој се мешају помоћу спиралног миксера.



Слика 62. Мешање лака и катализатора у глави робота



Слика 63. Наношење лака у СС кабинџ

Након нанетог и последњег слоја, браници лифтом путују на трећи ниво, у другу сушару, где проводе 40 min на 90°C. Овај процес је од изузетне важности за сазревање слојева боје и постизање одређене отпорности на хабање. Стога се температура у сушари строго контролише додатним тестовима помоћу Dataraq уређаја.



Слика 64. Dataraq уређај за контролу температуре у сушари

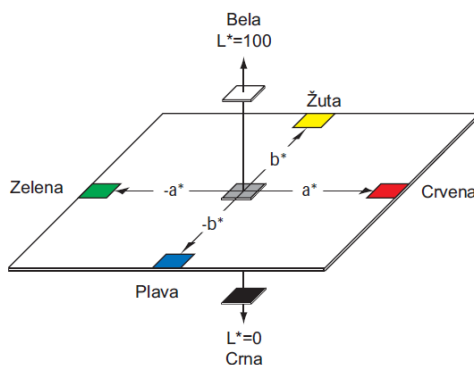
Овај уређај се састоји од сонди распоређених на површини браника, уређаја за прикупљање података и кућишта које је отпорно на изложеност високим температурама. Након прикупљања података, приступа се њиховом уношењу у посебан софтвер који графички приказује дијаграме време-температура за сваку сонду засебно. Према посебној норми за овакав вид процеса захтева се да свака сонда проведе минимум 25 min на 85°C.

После сушаре, браници проводе 15 min у зони за хлађење. Температура у овој зони је 20°C. Браници даље одлазе на станицу излагања где се проверава њихов квалитет пре одласка у монтажу.

4.8. Контрола колориметрије

Колориметар - Колориметар одређује боју коришћењем $L^*a^*b^*$ вредности и Делта Е. L^* означава скалу црне и беле; a^* црвену и зелену; b^* плаву и жути. Новији модели имају и додатне могућности.

Спектрофотометар - Спектрофотометар је тип колориметра који обезбеђује одређивање боја $L^*a^*b^*$ система и делта Е. Има особине колориметра али може се користити и за скенирање у оквиру спектра таласних дужина. Поред тога, мери и нешто другачије карактеристике, као што су трансмитанца (повезано са апсорбанцом) или рефлектанцу узорка, транспарентне или непрозирне чврсте узорке као полирано стакло или гасове. Поље примене спектрофотометра је много шире у односу на колориметар. Врши исте функције као и колориметар, уз додатне могућности.



Слика 65. $L^*a^*b^*$ координатни систем

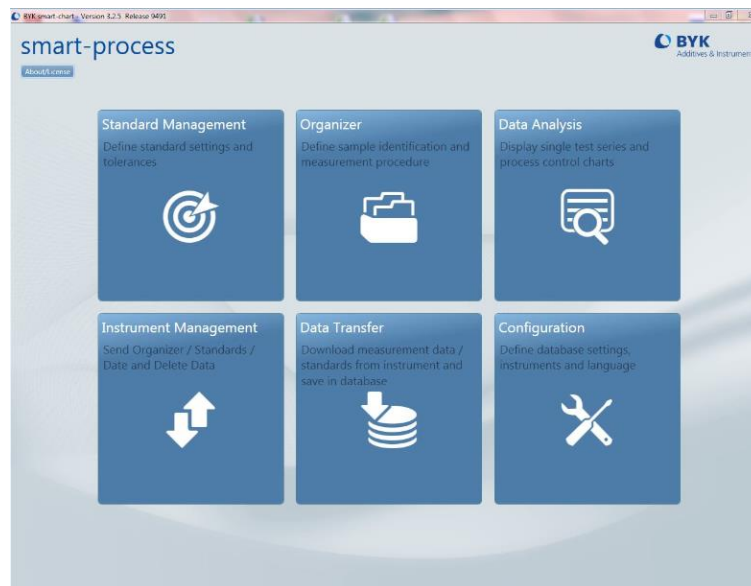
Један од најважнијих поступака контроле квалитета обојене компоненте је управо провера колориметријским мерењем боје. Колориметрија се контролише *ВУК-мас i* уређајем. Веома је важно да постоји тзв. поклапање боја (Color match) између каросерије аутомобила и пластичних компонената, у конкретном случају браника. *ВУК-мас i* уређај ради на принципу координатног система супротних боја.



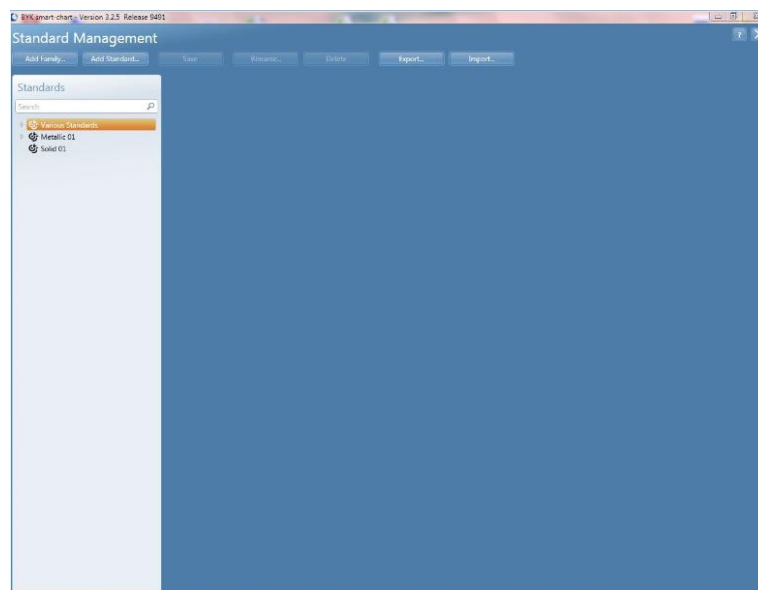
Слика 66. Изглед *ВУК-мас i* уређаја са припадајућом опремом

Да би се уређај користио за колориметријско мерење неке боје, неопходно је да се најпре учита дигитални стандард за ту боју. Дигитални стандард развија R&D одељење у сарадњи са произвођачем боје. Учитавање стандарда се врши преко ВУК рачунарског

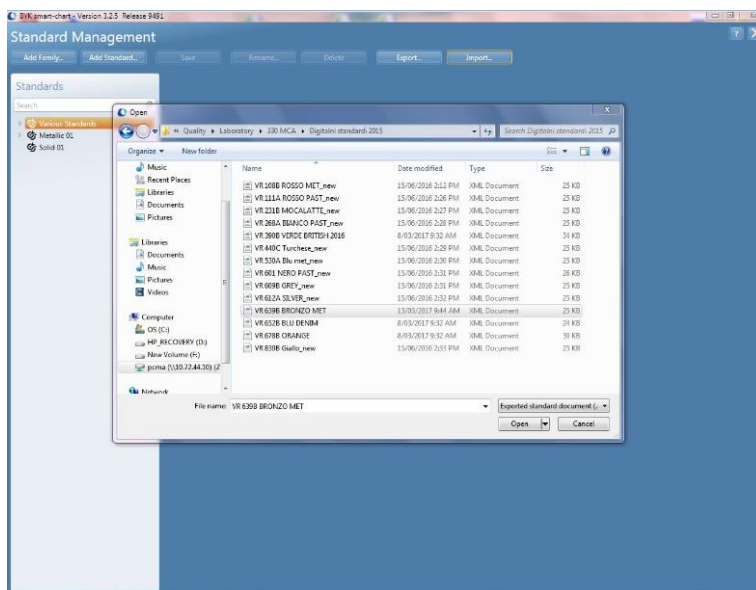
софтвера. Неопходно је повезати уређај са рачунаром и покренути програм. Затим је потребно изабрати опцију за уношење новог стандарда Various Standards, и након отварања прозора изабрати стандард из рачунарске меморије. У стаблу са леве стране ће се појавити унети стандард.



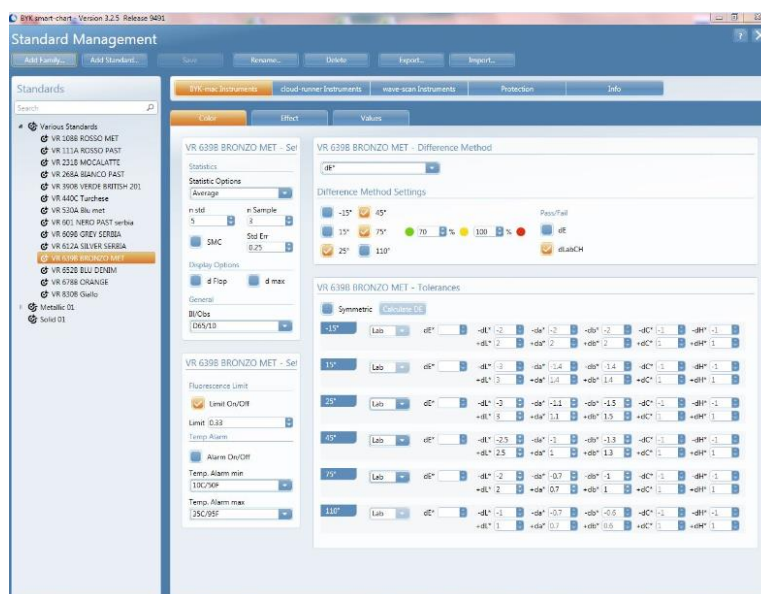
Слика 67. Основни прозор софтвера ВУК уређаја



Слика 68. Прозор софтвера ВУК уређаја након отварања опције Standard Management

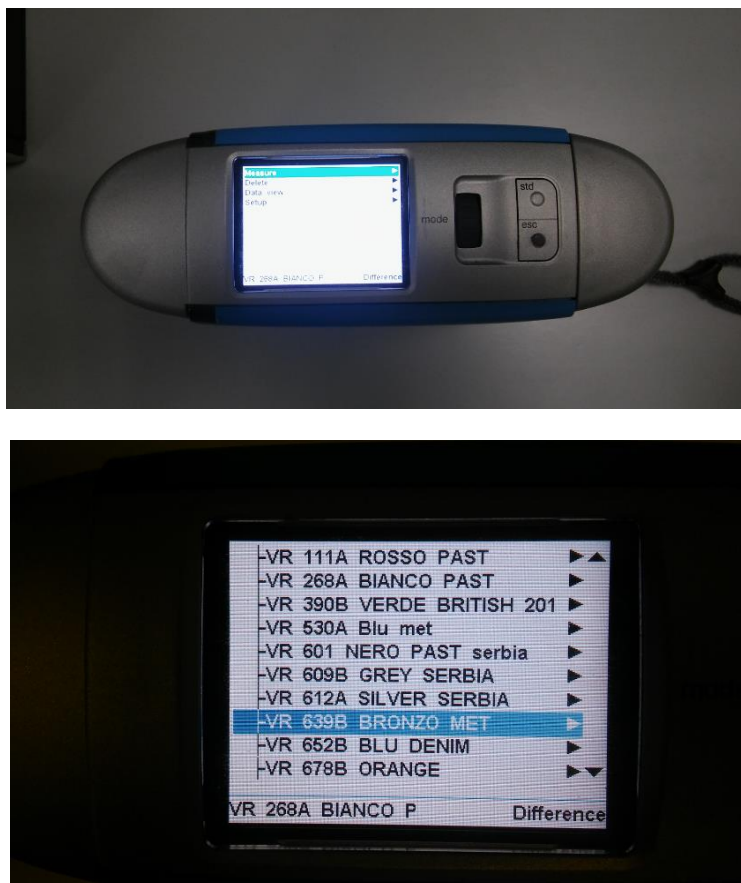


Слика 69. Прозор софтвера ВУК уређаја након отварања опције Various Standards



Слика 70. Прозор софтвера ВУК уређаја након уношења новог стандарда

Укључивањем уређаја на дисплеју се може проверити да ли је дигитални стандард учитан. Дигитални стандард ће се појавити у стаблу стандарда, након чега је могуће извршити мерење, односно упоређивање боје мерених компонента са дефинисаним стандардом.

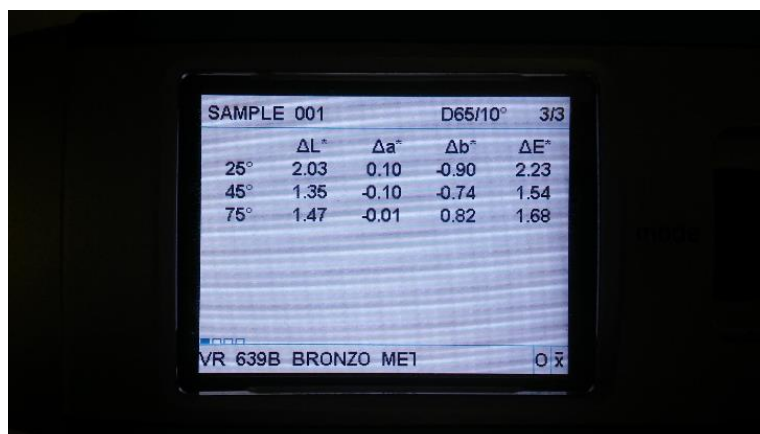


Слика 71. Приказ новог стандарда на уређају

Уређај се наслања на површину браника у зони где се браник касније спаја са каросеријом. раде се три мерења по страни са помаком од приближно 20 mm, након чега инструмент израчунава средњу вредност. На овај начин се добија једно мерење. Поступак се понавља бар четири пута за један пар браника.

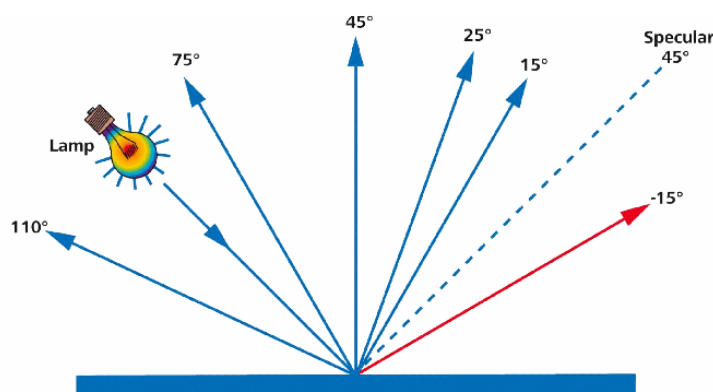


Слика 72. Коришћење уређаја на површини компоненте



Слика 73. Пример читавања измерених вредности боје

Очитавања се према нормама компаније врше за три угла и то: 25°, 45° и 75°. Са овим уређајем је могуће мерити шест различитих углова одбијања светлости.



Слика 74. Приказ углова које је могуће мерити ВУК тас и уређајем

На следећој табели могу се видети толеранције за мерења 639 металик бронзане боје у $L^*a^*b^*$ систему.

639 metallic bronze - tolerance										
VR 639B BRONZO MET		L*			a*			b*		
D65/10		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04	7,41
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3	1
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3	-1

Табела 3. Толеранције за 639 бронзану боју

Уз испоруку нове боје, добављач обавезно доставља и плочицу која је обојена том бојом, у условима и параметрима приближно истим као у погону произвођача компонената. Мерењем овакве плочице колориметром, морају се добити вредности које су у толеранцијама према претходној табели.

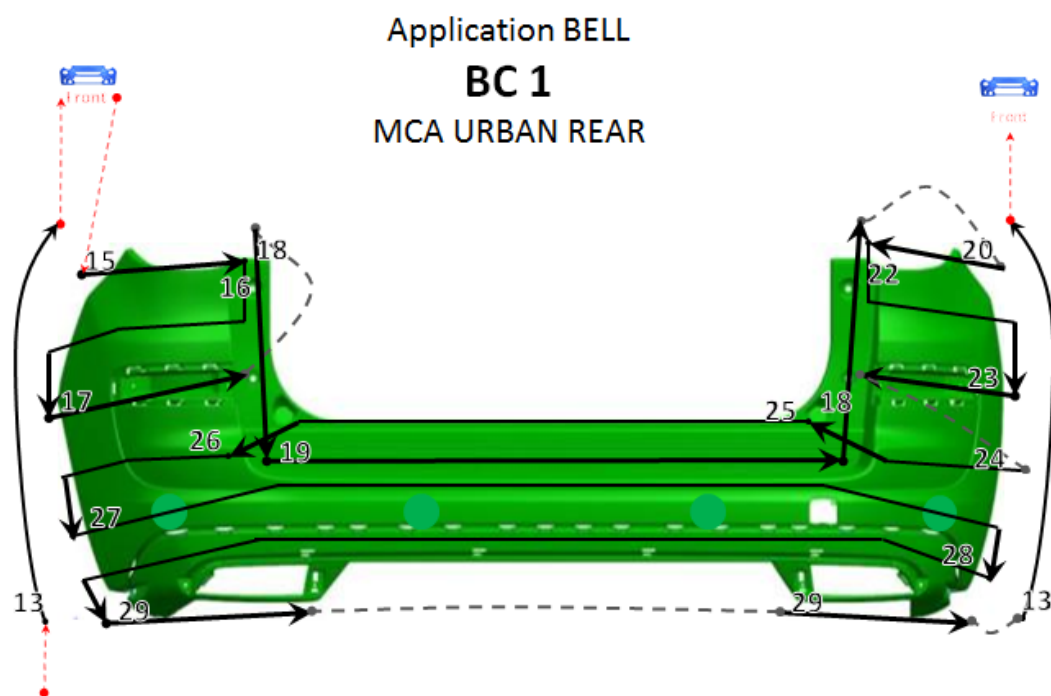


Слика 76. Стандард плочица за 639 металик бронзану боју

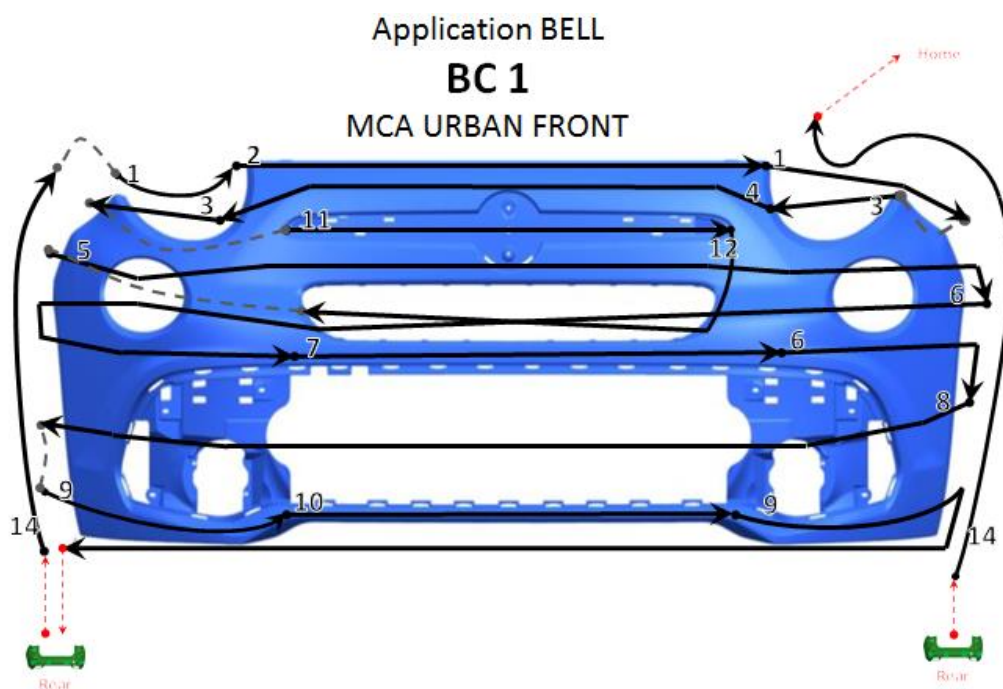
4.9. Проблеми и грешке при процесу бојења

Добијање исте боје различитих врста материјала је веома сложено. Изузетно је тешко без корекција и модификација што параметара бојења и путања робота, што саме боје, добити идеална мерења свих кључних параметара. Неретко се дешава да се решавањем једног проблема ствара неки други, па стога се мора строго водити рачуна и о најситнијим детаљима приликом унапређења процеса. На пример, решавањем недовољне дебљине боје у појединим зонама мора се водити рачуна да се не произведе вишак, тзв. сливање боје у некој другој зони. Мора се имати у виду да је геометрија браника изузетно сложена, далеко сложенија од равних, или благо закривљених површина. Стога, све те оштре ивице, прелази, увале и џепови задају многобројне муке технолозима процеса. У већини случајева, проблем се решава модификовањем више параметара. На пример, поменут проблем дебљине се, у зависности од зоне до зоне, може решити повећањем протока боје, повећањем протока ваздуха на Shaping air-у које узрокује скупљање спреја, успорењем путање робота у тој зони и евентуалним убрзавањем путање у суседној, критичној зони уколико је она обухваћена делом путање са истим параметрима.

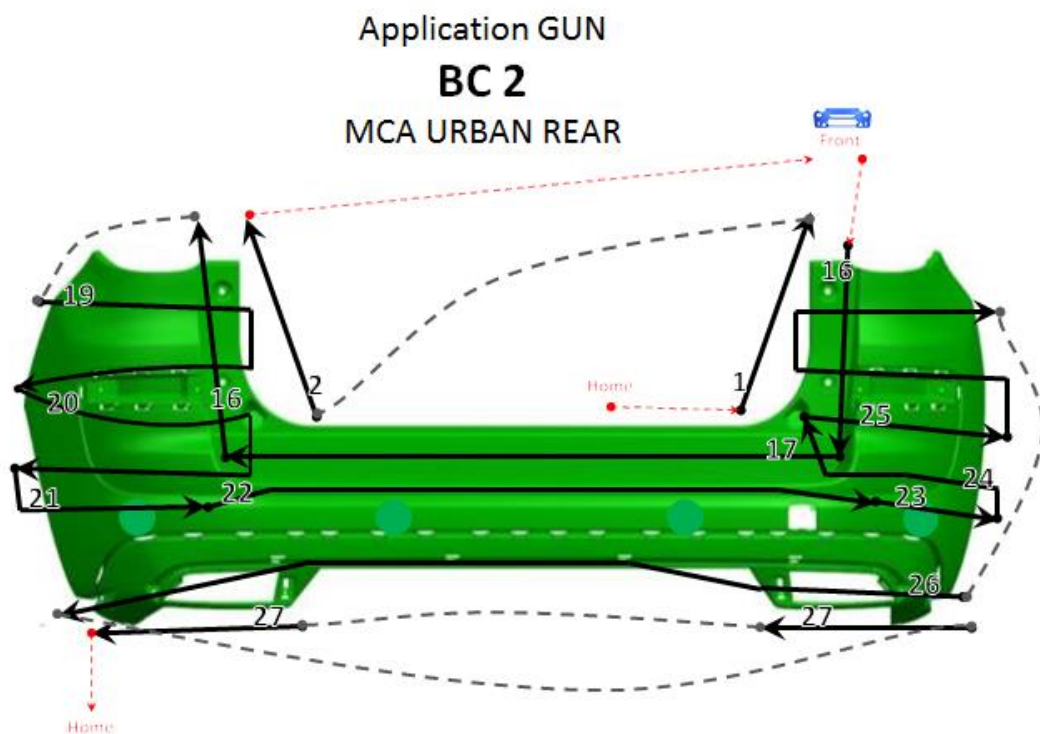
Део путање у коме спреј има исте параметре бојења назива се Brush. Једним Brush-ом може бити обухваћено више различитих делова путања, а минимум две тачке путање. Функцијама Spray on и Spray off се дефинише када ће Brush да се активира, односно деактивира. Прелаз са једног на други Brush може бити без прекида спреја.



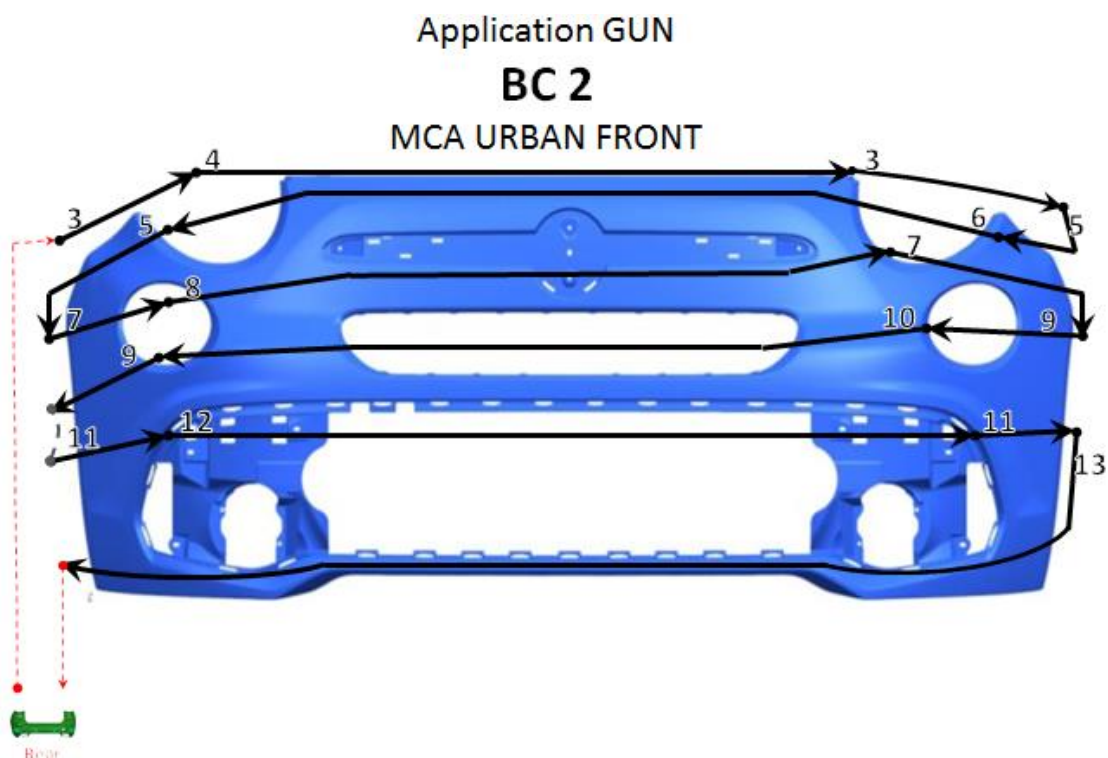
Слика 77. Распоред Brush-ева за задњи браник, BC1 робот



Слика 78. Распоред Brush-ева за предњи браник, BC1 робот



Слика 79. Распоред Brush-ева за задњи браник, BC2 робот



Слика 80. Распоред Brush-ева за предњи браник, BC2 робот

У следећим табелама могуће је видети вредности параметара бојења за BC1 и BC2 роботе, једног модела браника, за боју 639 металик бронзану.

	Flow (cc/min)	Shaping Air (l/min)	Turbine Speed (kt/min)	High Voltage (kV)	Comment
1	580	400	40	60	Top bok
2	570	400	40	70	Top
3	550	280	40	60	Iznad DRL
4	400	300	40	60	Iznad LOGO
5	400	280	40	60	Preko DRL
6	240	280	40	60	Ispod DRL - preko Gi
7	300	300	40	60	Lajsna ispod Grid
8	430	400	40	70	Bok ispod Grid lajsn
9	500	300	40	60	Završno bocno
10	500	300	40	40	Donja lajsna
11	300	400	40	30	Iznad Grid
12	120	300	40	0	Grid
13	350	400	40	45	Zadnji bocno New
14	350	400	40	50	Prednji bocno END FR UF
15	300	300	40	60	Levo top REAR URBAN, S
16	280	250	40	60	Levo Central
17	220	200	40	60	Levo Sredina
18	430	300	40	40	Vertikala
19	200	300	40	50	Steper
20	330	400	40	60	Desno Top
21	420	300	40	70	Desno Bok
22	400	300	40	60	Desno Front
23	600	300	40	60	Desno Central
24	450	300	40	50	Desno ispod svetla
25	350	300	40	60	Lajsna
26	250	280	40	60	Levo ispod svetla
27	230	260	40	40	Ispod stepera
28	350	400	40	40	Iznad spojlera
29	100	180	40	40	Završno dole
30	0	0	0	0	
31	0	0	0	0	
32	0	0	0	0	
33	0	0	0	0	
34	0	0	0	0	
35	0	0	0	0	
36	0	0	0	0	
37	0	0	0	0	
38	0	0	0	0	
39	0	0	0	0	
40	0	0	0	0	
41	0	0	0	0	
42	0	0	0	0	
43	0	0	0	0	
44	0	0	0	0	
45	0	0	0	0	
46	0	0	0	0	
47	0	0	0	0	
48	0	0	0	0	
49	0	0	0	0	
50	550	350	40	40	Waiting

Табела 4. Параметри 639 металик
бронзане боје, BC1 робот

	Flow (cc/min)	Fan Air (l/min)	Center Air (l/min)	High Voltage (kV)	Comment
1	160	250	160	0	Corner 1 BC2 URBAN FR
2	230	250	200	0	Corner 2
3	550	390	330	0	Top Bok
4	600	480	300	0	Top
5	600	480	300	0	Front 1 Bok
6	600	480	300	0	Front 1
7	600	480	300	0	Front 2 Bok
8	600	480	300	0	Front 2
9	600	480	300	0	Front 3 Bok
10	600	480	300	0	Front 3
11	600	480	300	0	Front 4 Bok
12	600	480	300	0	Front 4
13	600	480	300	0	Front 5 Bok
14	600	480	300	0	Front 5 END BC2 URBAN
15	600	480	300	0	Front 6
16	600	480	300	0	5. Door vert
17	300	250	270	0	Foot Step
18	420	480	300	0	Rear Left 1
19	400	520	300	0	Rear Left 2
20	250	520	300	0	Rear Left 3
21	250	480	250	0	Rear Left 4
22	400	450	250	0	Rear Central 1
23	400	450	300	0	Rear Right 3
24	450	450	250	0	Rear Right 2
25	450	450	250	0	Rear Right 1
26	300	390	300	0	Rear Central 2
27	210	390	300	0	Rear Bottom
28	0	0	0	0	
29	0	0	0	0	
30	0	0	0	0	
31	0	0	0	0	
32	0	0	0	0	
33	250	450	200	0	Anti Stains
34	0	0	0	0	
35	0	0	0	0	
36	0	0	0	0	
37	0	0	0	0	
38	0	0	0	0	
39	0	0	0	0	
40	0	0	0	0	
41	0	0	0	0	
42	0	0	0	0	
43	0	0	0	0	
44	0	0	0	0	
45	0	0	0	0	
46	0	0	0	0	
47	0	0	0	0	
48	0	0	0	0	
49	0	0	0	0	
50	550	400	300	0	Waiting

Табела 5. Параметри 639 металик
бронзане боје, BC2 робот

На следећој слици је приказан редослед извршавања потпрограма приликом фарбања пара једног од модела браника, за BC1 робот.

B2U_F&R.JBI

CALL JOB:B2_ENGRU (ENGAGEMENT INSIDE THE MASTER)

CALL JOB:B2RU-DD

CALL JOB:B2FU-DG

CALL JOB:B2UF_F

CALL JOB:B2TOUR4

CALL JOB:B2UR_FF

CALL JOB:B2RU-DG

CALL JOB:B2FU-DD

CALL JOB:B2_DEGRU (DEGAGEMENT)

Слика 81. Редослед потпрограма за BC1 робот

- JOB:B2_ENGRU – Робот из HOME позиције долази у позицију за бојење;
- JOB:B2RU-DD – Робот боји леви бок задњег браника;
- JOB:B2FU-DG – Робот боји леви бок предњег браника;
- JOB:B2UF_F – Робот боји предњи браник;
- JOB:B2TOUR4 – Робот врши ротацију 4, 5 и 6 осе како би заузео положај за бојење задњег браника;
- JOB:B2UR_FF – Робот боји задњи браник;
- JOB:B2RU-DG – Робот боји десни бок задњег браника;
- JOB:B2FU-DD – Робот боји десни бок предњег браника;
- JOB:B2_DEGRU – Робот се издиже изнад предњег браника и враћа у HOME позицију.

Због великог обима, у овом раду ће бити дат само потпрограма JOB:B2UF_F за бојење предњег браника. У програму се могу видети Brush-еви који су претходно описани, као и Spray on и Spray off функције.

/JOB	C00012=-1587.564,207.817,404.880,-90.91,-
//NAME B2UF_F	60.04,-131.96
//POS	C00013=-1482.335,312.457,377.240,-164.50,-
///NPOS 104,0,0,0,0	67.98,-82.66
///USER 10	C00014=-1297.980,393.904,358.676,-164.00,-
///TOOL 5	68.77,-95.57
///POSTYPE USER	C00015=-1113.679,417.585,336.504,-179.44,-
///RECTAN	74.65,-86.03
///RCONF 1,0,0,0,1,0,0,0	C00016=-830.209,402.852,332.599,127.42,-58.88,-
C00000=-413.654,27.283,428.802,-145.89,-8.75,-	39.85
142.89	C00017=-646.823,375.655,351.067,125.44,-54.37,-
///RCONF 1,0,0,1,1,0,0,0	44.04
C00001=-595.212,202.361,455.287,177.63,-34.67,-	C00018=-413.061,287.773,367.524,122.29,-47.76,-
129.15	48.83
///RCONF 1,0,0,0,1,0,0,0	C00019=-257.539,178.602,391.556,107.78,-36.92,-
C00002=-645.263,302.524,425.366,-164.49,-	50.86
20.75,-144.21	C00020=-129.675,-42.900,457.092,115.18,-25.50,-
C00003=-851.802,353.100,412.610,-164.49,-	68.13
20.75,-144.21	C00021=-123.849,-114.901,455.718,122.15,-7.66,-
C00004=-1109.582,361.228,407.959,-160.91,-	70.16
12.24,-159.51	C00022=-91.267,-111.751,470.837,115.18,-25.50,-
C00005=-1399.743,321.678,423.422,-159.23,-	68.13
7.86,-159.87	C00023=-111.813,-33.764,676.931,115.18,-25.50,-
///RCONF 1,0,0,0,0,0,0,0	68.13
C00006=-1522.598,225.379,458.087,-159.23,-	C00024=502.214,-82.033,736.995,-104.55,-20.18,-
7.86,-159.87	125.00
///RCONF 1,0,0,0,1,0,0,0	///RCONF 0,0,0,0,1,0,0,0
C00007=-1850.473,50.253,442.141,-164.11,-	C00025=66.068,44.394,1192.983,21.03,17.72,-
20.43,-158.42	85.01
C00008=-1813.894,-133.895,438.717,-164.11,-	C00026=-59.800,-115.446,637.091,98.15,47.16,-
20.43,-158.42	74.55
///RCONF 1,0,0,1,1,0,0,0	///RCONF 0,0,0,0,0,0,0,0
C00009=-1762.739,43.670,649.855,-128.17,-	C00027=-424.847,362.887,311.402,-13.65,75.37,-
42.32,-143.13	116.92
///RCONF 0,0,0,0,1,0,0,0	C00028=-671.843,409.449,306.084,-31.62,72.99,-
C00010=-1738.684,-59.277,491.730,-95.30,-47.90,-	136.60
119.25	C00029=-926.584,417.786,308.266,-70.12,57.29,-
C00011=-1702.180,18.988,474.767,-100.76,-	157.30
32.96,-114.57	C00030=-1123.187,388.874,306.036,-79.07,52.44,-
///RCONF 0,0,0,0,0,0,0,0	151.68

C00031=-1281.526,357.053,324.548,-98.79,54.92,-
 174.40
 C00032=-1216.506,387.634,136.156,-12.28,79.90,-
 123.05
 C00033=-833.652,379.300,165.996,-9.19,69.69,-
 99.49
 C00034=-558.725,383.030,186.902,-24.58,61.36,-
 90.11
 C00035=-448.694,359.938,193.673,-29.51,64.15,-
 91.62
 C00036=-209.590,275.990,251.692,117.22,69.28,-
 12.24
 ///RCONF 0,0,0,0,1,0,0,0
 C00037=49.986,-318.819,384.430,106.36,45.46,-
 63.23
 C00038=309.394,-311.018,377.866,106.36,45.46,-
 63.23
 ///RCONF 0,0,0,0,0,0,0,0
 C00039=238.903,-18.454,349.138,108.30,51.20,-
 49.15
 C00040=137.388,188.471,308.888,76.53,61.79,-
 54.23
 C00041=13.327,275.622,273.097,117.22,69.28,-
 12.24
 C00042=-196.793,375.237,246.288,-
 137.86,84.90,118.33
 C00043=-496.846,398.109,231.416,-
 112.02,77.80,148.60
 C00044=-782.295,405.202,231.088,-
 104.74,58.31,162.26
 C00045=-983.204,377.651,254.129,-
 105.66,51.57,174.91
 C00046=-993.520,360.838,267.956,-98.79,54.92,-
 174.40
 C00047=-1113.922,312.106,281.156,-89.11,57.73,-
 160.02
 C00048=-1282.947,156.794,345.521,-76.60,56.92,-
 131.04
 C00049=-1374.805,-18.351,327.165,-74.04,46.86,-
 111.42
 C00050=-1396.740,-149.067,324.828,-
 82.32,32.04,-108.73
 C00051=-1400.786,-234.042,332.707,-
 82.04,35.11,-108.23
 C00052=-1468.075,-132.943,220.569,-
 90.53,54.31,-108.36
 C00053=-1355.267,195.231,238.868,-
 165.47,73.54,150.42
 C00054=-1229.226,287.887,185.274,-
 169.67,64.67,126.82
 C00055=-1020.542,404.760,154.215,-
 169.67,64.67,126.82
 C00056=-713.449,446.438,133.408,-78.55,84.44,-
 159.36
 C00057=-415.915,430.410,133.253,41.76,85.82,-
 58.26
 C00058=-205.322,396.079,154.579,-65.50,84.52,-
 170.47
 C00059=40.004,294.999,192.692,117.69,68.42,-
 5.77

C00060=179.807,26.306,256.765,112.14,53.02,-
 35.49
 ///RCONF 0,0,0,0,1,0,0,0
 C00061=279.326,-169.271,258.343,106.36,45.46,-
 63.23
 C00062=287.110,-127.560,220.022,70.40,57.35,-
 85.31
 ///RCONF 0,0,0,0,0,0,0,0
 C00063=147.871,182.440,128.211,54.42,72.08,-
 97.61
 C00064=-92.218,370.692,71.144,27.16,72.98,-
 106.71
 C00065=-202.974,421.036,72.598,-66.09,67.60,-
 179.85
 C00066=-767.335,440.394,63.495,-74.72,24.47,-
 169.19
 C00067=-924.933,416.435,76.891,-81.62,15.21,-
 163.45
 C00068=-1100.101,367.122,71.052,-76.84,-8.20,-
 150.06
 C00069=-1284.494,176.804,126.619,-79.56,-
 23.76,-131.78
 ///RCONF 0,0,0,0,1,0,0,0
 C00070=-1484.285,-203.441,198.535,-85.18,-6.93,-
 125.30
 C00071=-1455.996,-182.525,96.937,-87.85,-9.70,-
 117.36
 C00072=-1354.315,156.912,32.707,-85.71,-5.89,-
 118.13
 C00073=-1257.198,317.979,-27.869,-70.45,-2.38,-
 149.72
 C00074=-1042.134,408.426,-56.591,-63.92,11.46,-
 154.32
 C00075=-873.865,422.429,-68.905,-56.98,25.79,-
 156.85
 ///RCONF 0,0,0,0,0,0,0,0
 C00076=-446.295,422.431,-68.904,-55.03,30.97,-
 169.04
 C00077=-278.025,408.429,-56.591,-32.76,55.26,-
 148.97
 C00078=-62.962,317.983,-27.869,-16.77,65.56,-
 141.72
 ///RCONF 0,0,0,0,1,0,0,0
 C00079=178.929,139.490,10.323,72.29,51.98,-
 73.78
 C00080=272.469,-131.214,87.863,73.90,43.21,-
 87.88
 C00081=227.048,-171.504,115.861,88.98,44.13,-
 70.73
 C00082=573.594,-222.180,7.922,89.10,35.75,-
 70.56
 C00083=589.012,-130.423,10.746,66.99,49.08,-
 87.58
 C00084=512.124,119.221,-56.995,52.55,58.57,-
 96.49
 ///RCONF 0,0,0,0,0,0,0,0
 C00085=175.223,339.832,-170.031,-
 147.27,68.02,92.22
 C00086=-60.669,366.820,-181.690,-
 177.48,69.01,82.44

C00087=-399.169,363.272,-
 185.360,166.50,68.22,81.26
 C00088=-606.135,349.754,-181.482,-
 178.44,70.41,108.97
 C00089=-837.945,246.949,-116.134,-
 113.30,75.55,-176.92
 C00090=-978.638,119.581,-60.914,-68.06,49.62,-
 107.46
 C00091=-1040.740,-119.008,2.641,-79.78,23.98,-
 92.78
 C00092=-1041.281,-147.006,-78.647,-79.78,23.98,-
 92.78
 C00093=-965.155,64.704,-139.854,-21.76,44.32,-
 56.76
 C00094=-841.121,221.210,-193.611,-8.33,40.57,-
 57.73
 ///RCONF 0,0,0,1,0,0,0
 C00095=-590.097,358.854,-189.751,-3.90,40.69,-
 73.34
 C00096=-422.924,362.341,-196.776,0.46,40.25,-
 80.94
 C00097=-35.936,362.307,-193.185,5.78,43.93,-
 92.41
 C00098=116.378,359.131,-187.101,6.91,43.88,-
 104.19
 C00099=378.664,218.298,-192.819,14.08,48.27,-
 116.82
 C00100=510.358,67.671,-142.102,16.28,38.88,-
 131.02
 C00101=592.830,-159.565,-55.868,40.17,24.00,-
 117.49
 C00102=576.698,-197.777,-57.451,40.17,24.00,-
 117.49
 C00103=519.160,-118.897,-344.908,109.67,-
 12.70,-94.30
 ///INST
 ///DATE 2016/09/28 10:50
 ///COMM
 ///ATTR SC,RW,RJ
 ///FRAME USER 10
 ///GROUP1 RB1
 NOP
 SYSTART CV#(1) STP=60.000
 DOUT OG#(36) 1
 SYMOVL C00000 V=800.0 CV#(1) CTP=71.242
 PL=2
 SPYON GUNNO=1 ANT=-0.50
 SYMOVL C00001 V=800.0 CV#(1) CTP=71.242
 PL=2 NWAIT
 DOUT OG#(36) 2
 SYMOVL C00002 V=800.0 CV#(1) CTP=200.000
 PL=2
 SYMOVL C00003 V=600.0 CV#(1) CTP=200.000
 PL=2
 SYMOVL C00004 V=600.0 CV#(1) CTP=200.000
 PL=2
 SYMOVL C00005 V=600.0 CV#(1) CTP=110.319
 PL=2
 SYMOVL C00006 V=600.0 CV#(1) CTP=200.000
 PL=2

DOUT OG#(36) 1
 SYMOVL C00007 V=1000.0 CV#(1) CTP=71.242
 PL=2
 SYMOVL C00008 V=1100.0 CV#(1)
 CTP=265.526 PL=2
 SPYOF GUNNO=1 ANT=0.20
 DOUT OG#(36) 50
 SYMOVJ C00009 VJ=50.00 CV#(1) CTP=209.211
 PL=2
 SYSTART CV#(1) STP=200.000
 DOUT OG#(36) 3
 SYMOVL C00010 V=899.0 CV#(1) CTP=260.000
 PL=2
 SYMOVL C00011 V=899.0 CV#(1) CTP=260.000
 PL=2 NWAIT
 SPYON GUNNO=1 ANT=-0.30
 SYMOVL C00012 V=900.0 CV#(1) CTP=260.000
 PL=2
 SYMOVL C00013 V=900.0 CV#(1) CTP=206.595
 PL=2
 DOUT OG#(36) 4
 SYMOVL C00014 V=900.0 CV#(1) CTP=206.595
 PL=2
 SYMOVL C00015 V=1000.0 CV#(1)
 CTP=206.595 PL=2
 SYMOVL C00016 V=1000.0 CV#(1)
 CTP=206.595 PL=2
 SYMOVL C00017 V=1000.0 CV#(1)
 CTP=206.595 PL=2
 SYMOVL C00018 V=1200.0 CV#(1)
 CTP=260.000 PL=2
 DOUT OG#(36) 3
 SYMOVL C00019 V=899.0 CV#(1) CTP=260.000
 PL=2
 SYMOVL C00020 V=899.0 CV#(1) CTP=260.000
 PL=2
 SYMOVL C00021 V=899.0 CV#(1) CTP=265.526
 PL=2
 SPYOF GUNNO=1 ANT=0.20
 DOUT OG#(36) 50
 SYMOVL C00022 V=1100.0 CV#(1)
 CTP=260.000 PL=2
 SYMOVL C00023 V=1000.0 CV#(1)
 CTP=260.000 PL=2
 SYMOVL C00024 V=1000.0 CV#(1)
 CTP=260.000 PL=2
 SYMOVL C00025 V=1000.0 CV#(1)
 CTP=260.000 PL=2
 SYMOVL C00026 V=1000.0 CV#(1)
 CTP=260.000 PL=2
 SYSTART CV#(1) STP=330.000
 DOUT OG#(36) 11
 SYMOVL C00027 V=1000.0 CV#(1)
 CTP=350.000 PL=2 NWAIT
 SPYON GUNNO=1 ANT=-0.20
 SYMOVL C00028 V=1000.0 CV#(1)
 CTP=350.000 PL=2
 SYMOVL C00029 V=900.0 CV#(1) CTP=350.000
 PL=2

SYMOVL C00030 V=900.0 CV#(1) CTP=370.938
PL=2
SYMOVL C00031 V=900.0 CV#(1) CTP=370.938
PL=2
DOUT OG#(36) 12
SYMOVL C00032 V=1000.0 CV#(1)
CTP=366.840 PL=2
SYMOVL C00033 V=1200.0 CV#(1)
CTP=359.953 PL=2
SYMOVL C00034 V=1200.0 CV#(1)
CTP=332.917 PL=2
SYMOVL C00035 V=800.0 CV#(1) CTP=332.917
PL=2
SPYOF GUNNO=1 ANT=0.20
DOUT OG#(36) 50
SYMOVL C00036 V=1000.0 CV#(1)
CTP=366.840 PL=2
SYMOVL C00037 V=1000.0 CV#(1)
CTP=350.000 PL=2
SYSTART CV#(1) STP=520.000
DOUT OG#(36) 5
SYMOVL C00038 V=800.0 CV#(1) CTP=636.601
PL=2 NWAIT
SPYON GUNNO=1 ANT=-0.40
SYMOVL C00039 V=999.0 CV#(1) CTP=636.601
PL=2
SYMOVL C00040 V=1099.0 CV#(1)
CTP=645.434 PL=2
SYMOVL C00041 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00042 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00043 V=1100.0 CV#(1)
CTP=540.000 PL=2
SYMOVL C00044 V=1100.0 CV#(1)
CTP=540.000 PL=2
SYMOVL C00045 V=1100.0 CV#(1)
CTP=540.000 PL=2
SYMOVL C00046 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00047 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00048 V=800.0 CV#(1) CTP=645.434
PL=2
SYMOVL C00049 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00050 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00051 V=1099.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00052 V=999.0 CV#(1) CTP=583.342
PL=2
DOUT OG#(36) 6
SYMOVL C00053 V=1100.0 CV#(1)
CTP=583.342 PL=2
SYMOVL C00054 V=1000.0 CV#(1)
CTP=572.712 PL=2
SYMOVL C00055 V=1000.0 CV#(1)
CTP=540.000 PL=2

SYMOVL C00056 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00057 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00058 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00059 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00060 V=800.0 CV#(1) CTP=572.712
PL=2
SYMOVL C00061 V=700.0 CV#(1) CTP=636.601
PL=2
SYMOVL C00062 V=800.0 CV#(1) CTP=636.601
PL=2
SYMOVL C00063 V=800.0 CV#(1) CTP=636.601
PL=2
SYMOVL C00064 V=1000.0 CV#(1)
CTP=572.712 PL=2
SYMOVL C00065 V=800.0 CV#(1) CTP=636.601
PL=2
DOUT OG#(36) 7
SYMOVL C00066 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00067 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00068 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
DOUT OG#(36) 6
SYMOVL C00069 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00070 V=1000.0 CV#(1)
CTP=583.342 PL=2
SYMOVL C00071 V=1100.0 CV#(1)
CTP=583.342 PL=2
DOUT OG#(36) 8
SYMOVL C00072 V=1000.0 CV#(1)
CTP=583.342 PL=2
SYMOVL C00073 V=1000.0 CV#(1)
CTP=540.000 PL=2
SYMOVL C00074 V=900.0 CV#(1) CTP=540.000
PL=2
SPYOF GUNNO=1
SYMOVL C00075 V=800.0 CV#(1) CTP=540.000
PL=2
SYMOVL C00076 V=800.0 CV#(1) CTP=540.000
PL=2 NWAIT
SPYON GUNNO=1 ANT=-0.30
SYMOVL C00077 V=800.0 CV#(1) CTP=540.000
PL=2
SYMOVL C00078 V=1000.0 CV#(1)
CTP=540.000 PL=2
SYMOVL C00079 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SYMOVL C00080 V=1000.0 CV#(1)
CTP=636.601 PL=2
SPYOF GUNNO=1
DOUT OG#(36) 50
SYMOVL C00081 V=800.0 CV#(1) CTP=540.000
PL=2
SYSTART CV#(1) STP=900.000

DOUT OG#(36) 9
SYMOVL C00082 V=800.0 CV#(1) CTP=900.000
PL=2
SYMOVL C00083 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2 NWAIT
SPYON GUNNO=1 ANT=-0.30
SYMOVL C00084 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00085 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
DOUT OG#(36) 10
SYMOVL C00086 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00087 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00088 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2 NWAIT
SYMOVL C00089 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
DOUT OG#(36) 9
SYMOVL C00090 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00091 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00092 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00093 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00094 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00095 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00096 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00097 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00098 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2 NWAIT
SYMOVL C00099 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00100 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SYMOVL C00101 V=800.0 CV#(1) CTP=970.397
PL=2
SPYOF GUNNO=1
DOUT OG#(36) 50
SYMOVL C00102 V=800.0 CV#(1) CTP=900.000
PL=2
SYMOVL C00103 V=800.0 CV#(1) CTP=900.000
PL=2
END

Уколико се укрсте информације са претходних слика и табела, може се јасно разумети како се сетују параметри бојења и путање у појединим зонама браника. На пример, Brush 4 који боји зону предњег браника која се спаја са поклопцем мотора, има вредност 400 ml/min за количину боје, 300 l/min за количину ваздуха (Shaping air), 40.000 o/min за брзину окретања звона и 60kV за електростатичко наелектрисање боје. Када се томе додају информације из програмског блока кретања робота (маркирано жутом бојом), види се да је брзина кретања робота у овој зони између 900 и 1200 mm/s.

Проблеми и грешке које могу настати приликом бојења из различитих разлога су:

- капљице воде;
- нечистоће у виду честица;
- недовољна покривеност примарном бојом, бојом или лаком појединих зона;
- превише примарне боје, боје или лака (сливање) на појединим зонама;
- лоша адхезија примарне боје;
- лоши тестови лака на тврдоћу;
- прекомерни таласи (orange peel);
- недовољан сјај (gloss);
- колориметријска мерења ван толеранције;
- деформације услед оштећених носача...

5. ПРИМЕР: ПРОБЛЕМ КОЛОРИМЕТРИЈЕ 639 БРОНЗАНЕ МЕТАЛИК БОЈЕ

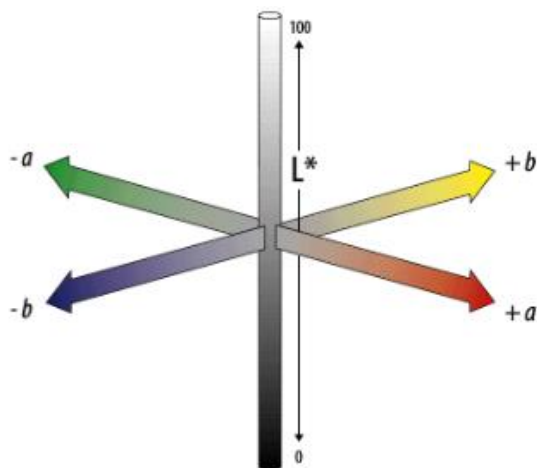
Појавом рестилизованог модела, појавио се и захтев за фарбањем компонената новим бојама. Једна од њих је управо VR-639 Bronzo, тј. бронзана металик боја. Постоји извесна разлика у начину бојења металик и обичним (solid) бојама, као и у утицају параметара на колориметријске карактеристике боје. Наравно, и на једне и на друге је могуће утицати параметрима, али је у случају металик боја то знатно теже. Стога су често потребне и друге методе.

Израђивањем новог програма трајекторије робота према геометрији рестилизованог браника и иницијалним сетовањем параметара бојења 639 бојом, добијене су спектрофотометријске вредности у толерантним подручјима. Након сужења толеранција због неочекивано великог визуелног ефекта непоклапања између браника и каросерије, дошло се до закључка да вредности на десној страни задњег браника испадају из толерантног поља.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Met Bronze 639 URBAN front and rear bumper, current production										
VR 639B BRONZO MET		L*			a*			b*		
D65/10		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04	7,41
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3	1
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3	-1
CheckZone	Status	dL*			da*			db*		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Match to Std										
Front right FR	Pass	-0,69	0,57	0,84	-1,01	0,02	0,37	-0,77	0,21	0,96
Front left FL	Pass	-0,93	0,79	1,17	-0,92	0,52	0,62	-1,13	0,49	0,89
Front center right FCR	Pass	-0,13	0,58	0,89	-0,91	-0,32	0,23	-0,74	-0,12	0,94
Front center left FCL	Pass	-0,36	0,72	1,02	-0,84	-0,11	0,34	-0,35	0,18	0,78
Rear right RR	Fail	-0,12	0,15	0,67	-2,55	-1,3	-0,32	-1,69	-0,85	0,55
Rear left RL	Pass	-0,48	-0,42	0,39	-0,84	-0,88	-0,29	0,16	-0,42	0,46



Слика 82. Тачке ван толеранције на задњој десној страни

Слика 83. $L^*a^*b^*$ координатни систем

Задња десна страна није у толеранцији на 25° и 45° степени на a^* у негативном смеру, као и на 25° на b^* у негативном смеру. Према $L^*a^*b^*$ координатном систему и предзнаку испред вредности, поредећи са стандардом, закључује се да боја тежи зеленом и плавом пољу на поменутиим угловима посматрања.

Одступање је уочено само на 639 боји како у мат тако и сјај верзији, а осталих 10 боја је у толеранцијама, визуелно и колориметријски. Намеће се закључак да се у овом случају путање робота не смеју модификовати.

Следећи корак је покушати вратити боју у толерантно подручје променом параметара BC1 и BC2 робота. Са слике за распоред Brush-ева за задњи браник уочава се да утицај имају Brush-еви 20, 22, 23 и 24 за звоно и 24 и 25 за пиштољ, стога ће само они и бити модификовани. Направљена је комбинација од 9 различитих параметара као 9 различитих тестова како би се испитао утицај промене појединачних параметара и њихове комбинације. Сваки тест спровести на узорку од 5 браника.

ТЕСТ 1

Тест 1 има за циљ праћење промена колориметрије смањењем протока боје на првом роботу, BC1, за приближно 20%.

TEST 1						
BC1			BC2			
BRUSH	FLOW	SH.AIR	BRUSH	FLOW	FAN AIR	CENT.AIR
20	270	400	24	450	450	250
22	320	300	25	450	450	250
23	480	300				
24	360	300				

Табела 6. Експериментални параметри бојења критичне зоне – тест 1

REAR bumper TEST 1										
VR 639B BRONZO MET		L*			a*			b*		
D65/10		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04	7,41
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3	1
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3	-1
CheckZone	Status	dL*			da*			db*		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Match to Std										
Rear right RR	Fail	-1,83	0,67	0,77	-1,92	-0,9	-0,28	-1,62	-0,41	0,68

Слика 84. Резултати мерења – тест 1

Резултат теста је да су се мерења благо померила у позитивном смеру на a^* и b^* , док су се мерења за L^* погоршала, али су још увек у заданим толеранцијама.

ТЕСТ 2

Тестом 2 је обухваћено смањење протока боје на BC2 роботу, за приближно 20%.

TEST 2						
BC1			BC2			
BRUSH	FLOW	SH.AIR	BRUSH	FLOW	FAN AIR	CENT.AIR
20	330	400	24	360	450	250
22	400	300	25	360	450	250
23	600	300				
24	450	300				

Табела 7. Експериментални параметри бојења критичне зоне – тест 2

REAR bumper TEST 2										
VR 639B BRONZO MET		L*			a*			b*		
D65/10		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04	7,41
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3	1
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3	-1
CheckZone	Status	dL*			da*			db*		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Match to Std										
Rear right RR	Fail	-1,13	-0,91	0,29	-2,98	-1,43	-0,24	-2,15	-1,34	0,16

Слика 85. Резултати мерења – тест 2

Резултат теста је погоршање вредности на a^* и b^* , у негативном смеру. У овом случају ван толеранције су и параметри a^* и b^* на 45 степени.

ТЕСТ 3

Током теста 3 извршено је смањење протока боје на првом роботу, BC1, за приближно 40%.

TEST 3						
BC1			BC2			
BRUSH	FLOW	SH.AIR	BRUSH	FLOW	FAN AIR	CENT.AIR
20	200	400	24	450	450	250
22	240	300	25	450	450	250
23	360	300				
24	270	300				

Табела 8. Експериментални параметри бојења критичне зоне – тест 3

REAR bumper TEST 3									
VR 639B BRONZO MET D65/10		L*			a*			b*	
		25	45	75	25	45	75	25	45
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3
CheckZone	Status	dL*			da*			db*	
		25	45	75	25	45	75	25	45
Match to Std									
Rear right RR	Fail	-1,94	-1,04	0,14	-1,27	-1,19	-0,34	-0,48	-0,72

Слика 86. Резултати мерења – тест 3

Резултат су нешто повољније вредности за а*, вредности у толерантном подручју за b*, и нешто лошија мерења, али још увек у толеранцијама за L*.

ТЕСТ 4

Тест 4 представља смањење протока боје на другом роботу, BC2, за приближно 40%.

TEST 4						
BC1			BC2			
BRUSH	FLOW	SH.AIR	BRUSH	FLOW	FAN AIR	CENT.AIR
20	330	400	24	270	450	250
22	400	300	25	270	450	250
23	600	300				
24	450	300				

Табела 9. Експериментални параметри бојења критичне зоне – тест 4

REAR bumper TEST 4									
VR 639B BRONZO MET D65/10		L*			a*			b*	
		25	45	75	25	45	75	25	45
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3
CheckZone	Status	dL*			da*			db*	
		25	45	75	25	45	75	25	45
Match to Std									
Rear right RR	Fail	-1,13	-0,91	0,29	-4,07	-1,71	-0,24	-3,25	-1,74

Слика 87. Резултати мерења – тест 4

Резултати теста су изузетно лоша мерења на a^* и b^* у негативном смеру, ка зеленом, односно плавом пољу од дефинисаног стандарда.

ТЕСТ 5

Тест 5 – повећање протока ваздуха за Shaping Air на BC1 роботу, за око 20%.

TEST 5

BC1		
BRUSH	FLOW	SH.AIR
20	330	480
22	400	360
23	600	360
24	450	360

BC2			
BRUSH	FLOW	FAN AIR	CENT.AIR
24	450	450	250
25	450	450	250

Табела 10. Експериментални параметри бојења критичне зоне – тест 5

REAR bumper TEST 5										
VR 639B BRONZO MET		L*			a*			b*		
D65/10		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04	7,41
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3	1
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3	-1
CheckZone	Status	dL*			da*			db*		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Match to Std										
Rear right RR	Fail	-1,12	-0,94	0,32	-2,78	-1,29	-0,18	-2,02	-1,24	0,16

Слика 88. Резултати мерења – тест 5

Резултат су лоша мерења на a^* и b^* , у негативном смеру.

ТЕСТ 6

Тест 6 је повећање протока ваздуха за Center Air и Fan Air на BC2 роботу, за око 10%.

TEST 6

BC1		
BRUSH	FLOW	SH.AIR
20	300	400
22	230	300
23	300	300
24	300	300

BC2			
BRUSH	FLOW	FAN AIR	CENT.AIR
24	450	490	280
25	450	490	280

Табела 11. Експериментални параметри бојења критичне зоне – тест 6

REAR bumper TEST 6										
VR 639B BRONZO MET		L*			a*			b*		
D65/10		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04	7,41
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3	1
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3	-1
CheckZone	Status	dL*			da*			db*		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Match to Std										
Rear right RR	Fail	-1,78	-0,64	0,24	-2,13	-0,88	-0,29	-1,52	-0,48	0,33

Слика 89. Резултати мерења – тест 6

Резултат су за нијансу боља мерења од иницијалних на 25° и 45° за a* и b*.

ТЕСТ 7

Тест 7 представља комбинацију смањења протока боје на BC1 роботу за око 40% (brush 23 за око 50%) и повећања протока боје на BC2 роботу за око 40%.

TEST 7						
BC1			BC2			
BRUSH	FLOW	SH.AIR	BRUSH	FLOW	FAN AIR	CENT.AIR
20	200	400	24	550	450	250
22	240	300	25	550	450	250
23	300	300				
24	270	300				

Табела 12. Експериментални параметри бојења критичне зоне – тест 7

REAR bumper TEST 7										
VR 639B BRONZO MET		L*			a*			b*		
D65/10		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04	7,41
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3	1
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3	-1
CheckZone	Status	dL*			da*			db*		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Match to Std										
Rear right RR	Fail	-3,23	-1,33	-0,24	-0,74	-0,34	0,17	-0,94	-0,55	0,59

Слика 90. Резултати мерења – тест 7

Резултат су знатно боља мерења за a* и b*, са погоршањем на L*.

ТЕСТ 8

Тест 8 садржи исту промену параметара као и тест 7, дакле смањење протока боје на BC1 роботу за око 40% (brush 23 за око 50%) и повећање протока боје на BC2 роботу за око 40%, и додатно повећање протока ваздуха на оба робота за 10%.

TEST 8						
BC1			BC2			
BRUSH	FLOW	SH.AIR	BRUSH	FLOW	FAN AIR	CENT.AIR
20	200	440	24	550	490	280
22	240	330	25	550	490	280
23	300	330				
24	270	330				

Табела 13. Експериментални параметри бојења критичне зоне – тест 8

REAR bumper TEST 8										
VR 639B BRONZO MET		L*			a*			b*		
D65/10		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04	7,41
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3	1
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3	-1
CheckZone	Status	dL*			da*			db*		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Match to Std										
Rear right RR	Pass	-2,96	-1,46	-0,12	-0,51	-0,21	0,25	-0,64	-0,32	0,67

Слика 91. Резултати мерења – тест 8

Резултат су мерења која су потпуно у толеранцији на свим угловима и критичном вредношћу на 25° за L* која је на доњој граници толерантног поља.

ТЕСТ 9

Тест 9 представља повећање протока боје на другом, BC2 роботу у односу на иницијалне параметре.

TEST 9						
BC1			BC2			
BRUSH	FLOW	SH.AIR	BRUSH	FLOW	FAN AIR	CENT.AIR
20	330	400	24	550	450	250
22	400	300	25	550	450	250
23	600	300				
24	450	300				

Табела 14. Експериментални параметри бојења критичне зоне – тест 9

REAR bumper TEST 9										
VR 639B BRONZO MET		L*			a*			b*		
D65/10		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04	7,41
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3	1
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3	-1
CheckZone	Status	dL*			da*			db*		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Match to Std										
Rear right RR	Fail	-1,99	-1,12	0,09	-1,11	-1,19	-0,12	-0,19	-0,72	0,27

Слика 92. Резултати мерења – тест 9

Резултат су вредности на a^* блиске толерантном пољу, али ипак изван толеранције.

На основу резултата тестова може се закључити да:

- Смањењем протока боје на ВС1 роботу добијају се повољнија мерења.
- Повећањем протока боје на ВС2 роботу добијају се повољнија мерења.
- Корекцијом протока ваздуха робота може се у мањој мери утицати на мерења.

Закључак је да за 639 боју неопходно је променити однос слојева првог и другог робота. Будући да је тестовима доказано да се са бојом добављача не може параметрима довести колориметрија у средину толерантног подручја, неопходно је кориговати боју пигментима.

Знатно је једноставније пигментима утицати на вредности L^* , осу тамно-светло, него на a^* и b^* , зелено-црвено и плаво-жуто. Стога за 639 металик бронзану боју постављају се параметри сетовани при тесту број 8, након чега је неопходно извршити проверу дебљине слоја боје и проверу адхезије, а критичну тачку на 25° за L^* је неопходно вратити ближе средини толерантног поља корекцијом боје.

У сарадњи са добављачем боје извршена је корекција боје са 0,8% пигмента на бази алуминијума за посветљење боје.

Понављањем тестова након корекције боје добијена су следећа мерења:

REAR bumper TEST 8 + 0,8% added corr										
VR 639B BRONZO MET		L*			a*			b*		
D65/10		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Absolute Values		35,87	17,83	8,86	18,88	11,91	6,26	23,68	15,04	7,41
Limit / Tol		3	2,5	2	1,1	1	0,7	1,5	1,3	1
Limit / Tol		-3	-2,5	-2	-1,1	-1	-0,7	-1,5	-1,3	-1
CheckZone	Status	dL*			da*			db*		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75
Match to Std										
Rear right RR	Pass	-1,62	-0,83	0,53	-0,42	-0,18	0,35	-0,44	-0,13	0,72

Слика 93. Резултати мерења – тест 8 са додатком пигмента

Тестовима адхезије је утврђено да не постоји промена у смислу лошег везивања боје међу слојевима, а тестом мерења дебљине слојева је потврђено да су сви слојеви у границама толеранција, од 18 – 22 μm за слој бронзане боје и од 50 – 90 μm за све слојеве.

Након свих обављених интерних тестова, експериментална, модификована серија браника је достављена главној лабораторији након чега је мерењима и визуелном евалуацијом модификација процеса и боје одобрена.

6. ЗАКЉУЧАК

Значај боја у савременој индустрији је изузетан, те произвођачи аутомобила улажу огромна средства у развој нових палета боја и аутоматизована, роботизована постројења за бојење каросерија аутомобила и пластичних компонената. Оваква постројења омогућавају потпуно изузеће мануелних операција у оваквим технолошким процесима, што је од изузетног значаја за хуманизацију рада, а са друге стране и постизање веће продуктивности и квалитета завршних производа. Човек је присутан само у операцијама одржавања система, контроле квалитета и евентуалне оптимизације процеса, искоришћења опреме и ресурса.

Међутим, технолозима оваквих процеса представља тешкоћу да се боја челичних делова каросерије и пластичних компонената у потпуности визуелно поклапа. Одступања настају због различитих карактеристика материјала, састава коришћене боје, процеса и услова припреме и бојења појединачних делова. Ипак, захтеви су строги и одступања не сме бити, или она морају бити сведена на минимум, односно оквире стандардима предвиђених толерантних подручја.

Наука која се бави мерењем боје зове се колориметрија. Циљ колориметрије, гране психофизике, је да пружи прост и прецизан начин мерења и спецификације светлости емитоване из извора или рефлектоване са неког објекта. У сврху мерења колориметрије су развијени системи представе боја, а кроз рад је описана практична примена CIELAB система који функционише на принципу представе боје преко оса координатног система L^* (тамно-светло), a^* (зелено-црвено) и b^* (плаво-жуто).

У раду је описано савремено постројење за бојење пластичних компонената, које је у потпуности аутоматизовано и роботизовано, опремљено са шест робота, системима за аутоматизован транспорт носача компонената, системима за складиштење и дистрибуцију боје, системима за одржавање параметара атмосфере бојења, температуре и влажности. Упоредо са описом су поменути сви кључни технолошки параметри роботизованог процеса бојења.

Роботизовано, аутоматизовано бојење је сложен процес на који утиче низ параметара. Поред строгих захтева регулисања параметара атмосфере бојења као што су влажност унутар кабине, температура, брзина струјања ваздуха и филтрирање ваздуха, на квалитет обојене компоненте утичу још и температура саме боје, вискозност, односно разређење боје. Сложеност се огледа и у правилном одабиру комбинације параметара апликације боје помоћу роботске главе, звона или пиштоља, тј. задавању параметара протока боје, ширине и јачине спреја, брзине ротације звона и јачине и ширине лепезе пиштоља, као и вредности наелектрисања боје. Оно што је такође важно је да се путања робота правилно програмира како би удаљеност од бојене компоненте, брзина у појединим тачкама и преклапања између пролаза била одговарајућа. Од овога у многоме зависи уједначеност дебљине боје на компоненти и одсуство дефеката као што су недовољна покривеност или, пак, вишак боје. Веома често је путању робота немогуће испрограмирати без додатних потпрограма ротације оса у циљу заузимања адекватне позиције робота за наставак трајекторије. Разлог томе је што и сам робот има ограничења у смислу кретања и ротација оса. Носач са компонентама се кроз кабину креће све време док траје бојење, тако да путања робота мора бити синхронизована са кретањем носача како не би дошло до колизије. Наравно, временским тактом самог

постројења је дефинисано и време по компоненти за које бојење мора бити обављено. Комуникација између система дистрибуције боја, апликације бојења, система транспорта и робота у сваком тренутку мора савршено да функционише како би се процес несметано одвијао. Када се поред свега поменутог дода и чињеница да добављачи боје нису у могућности да производе увек одређену боју са потпуно истим карактеристикама у различитим серијама, донекле се стиче утисак о комплексности оваквог вида процеса и тешкоћама да се испоштују веома строги захтеви контроле квалитета. Зато технолози и менаџери ових процеса често кажу у жаргону да је процес “жив” и да “има своју вољу”.

Конкретно је описан проблем лоших резултата колориметријских мерења металик бронзане боје након сужења толерантног подручја од стране произвођача аутомобила. Приказано је решење проблема лоших резултата мерења, које се базира на промени параметара апликације бојења на два робота у делу путање која покрива критичну зону, као и на корекцији боје додавањем пигмента. До решења се дошло експерименталном променом параметара бојења у девет различитих тестова и праћењем добијених резултата. Закључак је да се смањењем наноса боје на првом роботу уз истовремено повећање наноса на другом роботу значајније утиче на позитивно кретање вредности колориметријских мерења. Такође, корекцијом протока ваздуха за атомизацију је могуће у мањој мери утицати на вредности колориметрије. Корекцијом боје у смислу додавања пигмената такође се могу извести жељене модификације. У већини случајева решење проблема је комплексно и захтева комбинацију више модификација – параметара процеса, саме боје и путање робота.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Богдан Недић, Наташа Весић, Дарко Васиљевић, Боја, колориметрија и пластичне масе, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
- [2] Радојковић-Величковић М., Мијин Д., Органске боје и пигменти, Универзитет у Београду, Технолошко-Металуршки факултет у Београду, Београд, 2001.
- [3] Весић Н., Недић Б., Пројектовање оптичких инструмената, Зборник радова – Истраживање и развој машинских елемената и система (IRMES), Крагујевац, 2004.
- [4] Весић Н., Недић Б., Colorimetric characteristics of the light equipment in the automobile-industry, Vth International Conference on Tribology, University of Kragujevac, Mechanical Engineering Faculty Kragujevac, Kragujevac, 2005.
- [5] <http://www.eisenmann.com/en/products-and-services/automotive-systems.html>, 08.10.2018.
- [6] <https://www.sames-kremlin.com>, 14.10.2018.
- [7] <http://corporate.ppg.com>, 02.11.2018.
- [8] <https://www.grundfos.com>, 02.11.2018.
- [9] <https://www.byk.com>, 03.11.2018.
- [10] <http://www.fiatsrbija.rs>, 01.10.2018.