Градимир Чучуковић

SolidWorks и SolidCAM

ОСНОВЕ



CAD/CAM системи у пракси

CET

SolidWorks и SolidCAM основе

Градимир Чучуковић

ISBN 978-86-7991-394-4

Copyright © 2017. ЦЕТ, Београд.

Сва права задржана. Ниједан део ове књиге не може бити репродукован, снимљен, или емитован на било који начин: електронски, механички, фотокопирањем, или другим видом, без писане дозволе издавача. Информације коришћене у овој књизи нису под патентном заштитом. У припреми ове књиге учињени су сви напори да се не појаве грешке. Издавач и аутори не преузимају било какву одговорност за евентуалне грешке и омашке, као ни за њихове последице.

Рецензент	Милан Милутиновић
Лектура	Биљана Никић
Технички уредник	Предраг Бујић
Уредник	Дубравка Драговић Шеховић
Издавач	**ЦЕТ** Београд, Скадарска 45 тел/фах: (011) 3243-043, 3235-139, 3237-246 www.cet.rs
За издавача	Драган Стојановић, директор
Тираж	1000
Штампа	„Пекограф”, Београд

Савремене методе машинског пројектовања заснивају се на коришћењу изванредних могућности CAD/CAM система, путем којих је могуће веома брзо и уз минимум мануелног рада стићи од идеје до готовог производа високе тачности израде. Развој идеје и њено претакање у модел пуног тела са свим физичко-механичким карактеристикама изабраног материјала одвија се у CAD модулу, док се пројектовање технологије и припрема за израду на CNC машинама врши у оквиру CAM модула. Крајњи резултат ове симбиозе у области пројектовања је извршни програм („G-code"), који, унет у управљачку јединицу нумерички управљане машине, спроводи задату технологију израде производа.

Идеја за настанак ове књиге је проистекла из намере да се кроз практичне – реалне примере прикажу могућности савременог CAD/CAM програмског пакета, SolidWorks/SolidCAM, његова флексибилност и прилагодљивост решавању реалних проблема, како у оквиру моделирања реалног машинског дела, тако и у области пројектовања технологије за његову израду, па све до генерисања функционалног програмског кода за програмирање обраде на CNC машинама.

Кроз животни век инжењерских производа, компјутери имају истакнуту, често централну улогу. У процесу пројектовања производа и самој производњи, њихова улога постаје изузетно важна као последица притиска конкуренције која непрестано побољшава перформансе и квалитет својих производа и редукује период неопходан за развој истих, а све то применом рачунара.

Ова књига на практичан начин објашњава примену програмског пакета *SolidWorks/SolidCAM* и обухвата кључне модуле битне за пројектовање производа и технологије (*CAD/CAM*).

Аутор је успео да ову веома сложену и савремену материју успешно обради тако да може бити од користи свим машинским инжењерима и студентима који стичу знања и вештине у *SolidWorks*-у и *SolidCAM*-у. Цео текст је обогаћен технички дотераним сликама са јасним стилом изражавања.

Проф. др Милан Милутиновић, дипл. инж. маш.

Садржај

Увод vii

1. Технологија *CAD/CAM* система 1

Структура *CAD/CAM* система 5
Хардверске компоненте 8
Софтверске компоненте 9
Windows базирани *CAD/CAM* системи 10
Савремени CAD/CAM системи 13

2. *SolidWorks* – основе 3D моделирања 17

Интерфејс програма *SolidWorks* 21
Трака менија 21
Палете са алатима 24
Погледи у *SolidWorks*-у 28
Windows окружење *SolidWorks*-а 29
Подешавање радне површине 32
Режими рада у *SolidWorks*-у 35
Режим *Part* 36
Режим *Assembly* 42
Режим *Drawing* 44
Пројектовање пуних тела у програму *SolidWorks* 46

3. Моделирање основних облика 49

Моделирање тела правоугаоног попречног пресека 51
Моделирање осовине 62
Моделирање тела кружног попречног пресека 70
Коришћење алатке *Spline* и команде *Swept* 77
Још нека коришћења алатке *Swept Boss/Base* 83
Линијски и кружни шаблонски распоред елемената 87

Коришћење додатних референтних равни 100
Команда *Loftted Boss/Base* и њена примена 108
Моделирање спиралних објеката командом *Helix* 120

4. *SolidWorks* – моделирање склопова 135
Како до једноставног склопа 138
Моделирање тела точка 138
Моделирање ручице точка 143
Моделирање склопа ручног точка 146
Коришћење *Toolbox*-а у склоповима 153
Циркуларни и линијски шаблонски распоред елемената 166
Напредни услови упаривања 178
SolidWorks – склопови у пракси 186
Склоп точка на прихватном столу 186
Једностепени редуктор 188
Алат за пробијање и утискивање 192

5. Техничка документација у *CAD/CAM* системима 203
Погледи 211
Пресеци 213
Скраћени приказ 215
Димензионисање 218
Мој први цртеж 220
Радионички цртеж вратила 235
Технички цртежи склопова 249
Склопни цртеж ручне стеге 258

6. *SolidCAM* – Програмирање *CNC* система 273
Програмирање *CNC* система 276
Нумерички управљане машине алатке 278
Координатни системи 281
Координатни систем *NUMA* 283
Нулте тачке 285
Компензација полупречника алата 287
Структура програма 289
Линеарна и кружна интерполација 293
Циклуси 295

Методе програмирања *CNC* система 297
Ручно програмирање 297
Програмирање *CNC* система помоћу рачунара 302
SolidCAM технологија 306
Операције *SolidCAM* технологије 309
Пројектовање технологије 318
Избор машине 319
Дефинисање припремка 320
Технолошки поступак обраде 321
План обраде 324
План алата 325
План базирања 326
Пројектовање технологије применом програма *SolidCAM* 327
Координатни систем машине 329
Дефинисање припремка 334
Дефинисање изратка 337
Дефинисање алата 338
Дефинисање стезног прибора 340
Креирање нове операције 342
Симулација 353
Генерисање извршног програма (*G-code*) 356
Технологија за израду металне плоче 357

7. *SolidCAM* – Пројектовање технологије обраде стругањем 359

Пројектовање технологије за спољашњу обраду 363
Дефинисање *CAM-Part*-а 364
Дефинисање алата 369
Пројектовање технологије стругањем 376
Пројектовање технологије уздужне обраде 385
Израда жљеба 393
Нарезивање навоја 398
Операција одсецања 401
Пројектовање технологије за унутрашњу обраду 407
Забушивање 408
Бушење 412
Развртање 416

8. *SolidCAM* - Обрада глодањем 423
Обрада носача цилиндра *GSXR 750* 425
Дефинисање *CAMPart*-а и алата 426
Чеоно глодање 435
Операције бушења и упуштања 440
Обрада спољашње контуре 444
Обрада отвореног џепа 452
Обрада препознавањем џепа 457

9. *SolidCAM* – Обрада у више равни 465
Обрада дистрибуционог блока 469
Дефинисање координатног система 471
Дефинисање припремка и изратка 475
Коришћење модела стезног прибора 476
Дефинисање алата 478
Глодање горње равне површине 479
Обрада горње косе површине 482
Обрада задње површине 485
Обрада рупа и отвора 486

Литература 487

Увод

Процес пројектовања и израде једног машинског дела или склопа представља налажење таквог техничког решења које се практично може реализовати коришћењем доступне технологије, а да при томе задовољи и економске критеријуме. У ужем смислу, пројектовање представља дефинисање техничког решења са функционалног, садржајног и конструктивног аспекта.

Савремена машинска индустрија умногоме се ослања на савремене технологије, не само у оквиру машинске науке већ и на широком спектру иновација у технологији и индустрији уопште. Развој технологије је одредио правце развоја машинске индустрије и техника на којима се заснива развој једног машинског дела и његова обрада од сировог комада до готовог производа.

Класична организација поступка пројектовања и припреме производње примену рачунара користи за ефикаснију реализацију овог процеса. Поступак увођења рачунара условљен је формирањем базе података до нивоа радионичке документације производа. Активности пројектовања и конструисања производа применом рачунара познате су у стручној јавности под енглеским називом: *Computer Aided Design* (*CAD*). Скраћеницу *CAD* предложио је *T. D. Ross* (*USA*) и она је уведена у терминологију 1979. године. Скраћеница је симбол технологије пројектовања подржане рачунаром. Увођење рачунара у области припреме производње обележава се скраћеницом *CAP* (*Computer Aided Planing*), а сама производња подржана рачунаром позната је под енглеским називом *Computer Aided Manufacturing* (*CAM*).

Техничко-технолошки процеси, који леже у основи пројектовања и израде машинских производа, пружају могућност брзе, квалитетне и прецизне израде гарантујући тиме врхунски производ за своје купце. Савремена контрола и могућности промене програма, *CNC*[1] машинама омогућује разноврсну примену у оквиру тих процеса.

[1] *CNC (енгл. Computer Numerical Control – нумеричка контрола машина и алата путем рачунара).*

Најчешће се примена *CNC* машина повезује са управљањем машина алатки у индустрији обраде метала или неког другог материјала (на пример дрвета). Машинска обрада јесте била област прве примене *NC*[2] технологије и још увек је једна од најважнијих и најдоминантнијих. Сматра се да је машинска обрада један од најразноврснијих технолошких процеса, јер се може користити за добијање читавог спектра облика и површина. У самом процесу од сировине до финалног производа спроводи се више поступака, док се коришћењем савремених технолошких решења и применом *CAD/CAM* технологија долази до квалитетног и стандардизованог финалног производа.

Захваљујући *CNC* технологији и машинама, квалитет и потребну прецизност је много лакше постићи. Микропроцесор сваке машине чита извршни програм, написан у Г-коду[3] и преко управљачке јединице врши померање алата у жељеној равни чиме се остварује обрада. Програми се уносе ручно или преко специјализованог *CAM* софтвера у радну меморију *CNC* машине.

Од своје појаве па до данас, *CAD/CAM* технологије су имале и имају неизмеран утицај на развој производа. Највећи део производних компанија које диктирају правце развијања и обраде материјала, користе имплементиране *CAD/CAM* технологије. Као резултат овог утицаја, *CAD/CAM* технологије се сматрају највећим инжењерским достигнућем прошлог века, чији су опис и коришћење представљени у овој књизи. *CNC* машине представљају машине контролисане од стране рачунара. Примена рачунара данас је присутна код пројектовања производа, инжењерских прорачуна и анализа, пројектовања технолошког процеса и управљања информацијама. Управо *CNC* машине подржавају наведене операције и чине их успешним. Програмирање *CNC* машина једноставно представља оптималан, економичан начин пројектовања и производње без грешака које проистичу из мануелног управљања машинама.

Књига која је пред вама представља покушај да се на што једноставнији начин прикаже један од водећих *CAD/CAM* система данашњице, *SolidWorks/SolidCAM*. Замишљена као приручник са детаљним упутствима за моделирање и израду разнородних модела преузетих из машинске индустрије,

---

[2] *NC (енгл. Numerical Control) – нумеричка контрола (у општем смислу, уређаји, машине и сл.).*

[3] *Г-код (енгл. G-code) – извршни, управљачки, програмски код који разуме свака нумерички управљана машина алатка.*

ова књига се састоји из девет поглавља, која вас воде путем упознавања и савладавања програмског пакета *SolidWorks/SolidCAM*, његових алатки и команди.



Додатна објашњења у виду напомена, које су настале из практичне примене овог програмског пакета, биће обележена посебном ознаком коју видите на почетку овог пасуса.

Често ћете у тексту уочити изразе „ви ћете урадити то или оно", односно „ми ћемо користити ову или ону алатку или команду". Ко смо то „ми"? Ми смо ви који читате ову књигу, и ја, ваш водич кроз *SolidWorks* и *SolidCAM*. Овај начин писања је мој покушај да избегнем сувопарност једног уџбеника и да, истовремено, постигнем један личнији однос са читаоцем. Верујем да ћете, кроз тај „партнерски" однос, лакше прихватити и савладати изложено у овој књизи.



Због скучености простора на неким сликама (углавном на снимцима екрана) поједини параметри ће бити обележени бројевима. Они се односе на слику која се помиње у истом пасусу и углавном неће бити проблем открити на које параметре и опције се односе. На пример – (сл. 8.35, поз. 2).

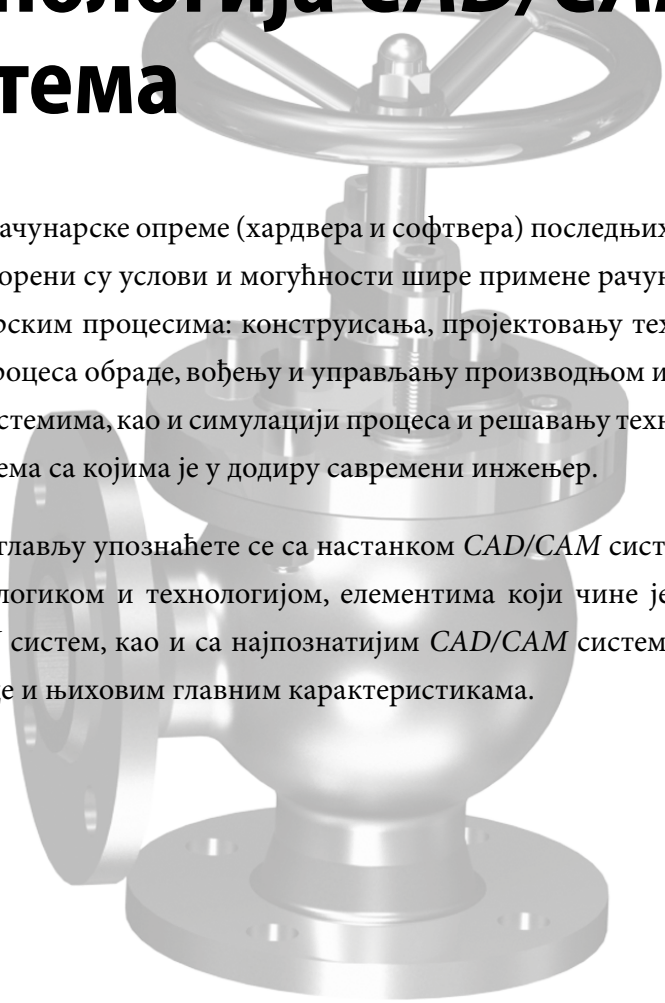
Позивам вас да заједно кренемо на ово узбудљиво путовање и да читањем ове књиге и практичним радом уз њу научите да моделирате као професионалац без мукотрпних покушаја и погрешака. Погледајте како сам то ја урадио, па урадите сами. Резултат неће изостати.

Аутор

ПОГЛАВЉЕ

1

Технологија *CAD/CAM* система



Развојем рачунарске опреме (хардвера и софтвера) последњих деценија створени су услови и могућности шире примене рачунара у инжењерским процесима: конструисања, пројектовању технологија и процеса обраде, вођењу и управљању производњом и обрадним системима, као и симулацији процеса и решавању техничких проблема са којима је у додиру савремени инжењер.

У овом поглављу упознаћете се са настанком *CAD/CAM* система, њиховом логиком и технологијом, елементима који чине један *CAD/CAM* систем, као и са најпознатијим *CAD/CAM* системима данашњице и њиховим главним карактеристикама.

Почетак развоја *CAD/CAM* система везује се за 1960. годину, у авионској и аутомобилској моторној индустрији, и то у области *3D*[1] површинске конструкције и *NC* програмирања. Прилагодљиве компјутерске апликације у дизајнирању донеле су предност програмирању и компјутерском софтверу у односу на традиционално инжењерско пројектовање. Током 1980-их година прошлог века долази до значајнијег развоја приметно поузданијих компјутерских програма у области *3D* моделирања. Кључни догађаји за 1981. су били појава програмских пакета за генерисање поузданог (чврстог) модела машинских делова–*Romulus* (*ShapeData*) и *Uni-Solid* (*Unigraphics*) и излазак на тржиште тзв. „површинских моделара" као што је *CATIA* (*Dassault Systemes*). Компанија *Autodesk* је основана 1982. године. Она уводи прво *2D*, а ускоро и *3D* систем моделирања у свој производ „*AutoCAD*". Следећа прекретница била је лансирање *Pro/Engineer*-а на тржиште *CAD* софтвера, 1988. године, што је наговестило већу употребу функција основних метода моделирања. *Pro/Engineer* деведесетих година прошлог века постаје лидер у *CAD/CAM/CAE*[2] апликацијама. Године 1999. *Autodesk* је преузео *Discreet Logic* и лансиран је кључни програм намењен машинству *Autodesk Inventor*.

Од 1991. *Microsoft* развија *Open GL* за *Windows NT*. *Open GL* је *API*[3] софтвер за креирање *3D* графике и садржи команде за цртање тачака, линија и сл., а, такође, садржи и подршку за сенке, текстуре, анимације, светлост, ефекте (као што је магла) и за разне симулације. Године 1995. представљен је *SolidWorks* као јефтини конкурент *CAD* програмима као што су *Pro/ENGINEER*, *Uni-Solid* и *CATIA*, и тренутно је један од најпопуларнијих производа на тржишту механичких *CAD* програма средње класе.

Почев од касних 1980-их, развојем доступних *CAD* програма који су могли да се користе на личним компјутерима, започео је тренд масовног смањивања одељења за пројектовање у мањим компанијама и повећања улагања у развој интелектуалних подручја креаторове вештине.

У светлу рачунарске подршке и интеграције релевантних производних функција и активности за машинску обраду било које врсте, а посебно у великосеријској и масовној производњи, користе се *CAD/CAM* системи,

---

[1] *3D – тродимензионалност; објекат представљен у 3 димензије*

[2] *CAE (енгл. Computer Aided Engineering) – компјутерски подржан инжењеринг (системи за прорачуне)*

[3] *API (енгл. Application Programming Interface) – посредник за дефинисање начина на које апликације могу да захтевају услуге (сервисе) од библиотека и/или оперативних система*

односно програмски системи за рачунаром подржану производњу. *CAD/CAM* системи имају широко значење, с обзиром да, у општем случају, покривају велики број функција и активности које припадају различитим областима производних система, техника и технологија. Генерално, *CAD/CAM* системи представљају програмске алате који подржавају интензивну употребу рачунара за планирање и пројектовање производних и технолошких процеса и операција и управљање производњом, односно производним процесима.

Основне функције *CAD/CAM* система везане су за планирање производно-технолошких процеса. Међу њима су:

- израда геометријског модела производа (машинског дела),
- генерисање производне документације,
- дефинисање технологије израде производа,
- генерисање припремка,
- генерисање и оптимизација путања алата,
- креирање и коришћење база података и каталога режима обраде и алата,
- прорачун времена израде,
- генерисање *NC* програма,
- симулација и визуелизација процеса израде.

Геометријски модел производа представља финални облик који треба постићи након израде, а припремак од кога настаје појединачни машински елемент другачијег је облика. *CAD/CAM* системи имају могућност за аутоматско генерисање припремка на основу геометријског модела производа. Ова функција заснива се на тзв. логици додатака за обраду, односно логици стандардних димензија материјала. Користећи габаритне димензије геометријског модела *CAD/CAM* систем генерише **модел припремка** и придружује га производно-технолошком моделу. У неким случајевима припремак поприма величину габаритних димензија модела, а има стандардни облик паралелопипеда (за призматичне моделе) или ваљка (за ротационе моделе). Аутоматско генерисање припремка није увек могуће, или није увек пожељно, па је кориснику остављена могућност директне интервенције и креирања припремка.

Генерисање производне документације у савременим *CAD/CAM* системима односи се, пре свега, на формирање документације у електронском облику погодном за размену између различитих учесника у развоју производа. Тако, на пример, за израду неког призматичног машинског елемента генерише се документ који садржи све релевантне податке о том елементу (радионички цртеж, план алата, план обраде, операциони лист и сл.). Како се данас комуникација ове врсте изводи у интернет окружењу, то се генерисање производне документације односи на аутоматско креирање докумената у пригодном формату. То може бити документ у *pdf*[4] или *HTML*[5] формату. Ти формати су погодни, не само за размену и прегледање на рачунару корисника, већ и за слање путем електронске поште или за штампање.

Дефинисање технологије израде производа је део функција унутар *CAD/CAM* система којима се сугерише пројектанту оптимална технологија за израду. Овако предложена технологија може бити коришћена као таква, делимично измењена од стране технолога, или одбачена у корист технологије дефинисане на традиционалан начин.

Генерисање и оптимизација путање алата је функција *CAD/CAM* система која се најчешће изводи у оквиру технолошког планирања. Међутим, има производних ситуација које захтевају накнадну проверу путања алата и њихову евентуалну корекцију и регенерацију. Оне се углавном спроводе приликом израде сложенијих производа, када су путање алата ограничене, не само конфигурацијом производа, већ и конфигурацијом машина, опреме и радне околине.

Креирање и коришћење базе података и дигиталних каталога машина, опреме, алата, прибора, режима рада и других битних елемената производног процеса од виталног је значаја за брзо и ефикасно моделирање и симулацију производње. *CAD/CAM* системи поседују посебне модуле за ту намену. Прорачун времена израде изводи се аутоматски на основу базних елемената при процесу обраде, узимајући у обзир величину и конфигурацију производа. У општем случају, време израде, поред главног времена, укључује сва припремна, помоћна и завршна времена, како обрадног подсистема, тако и монтажног, транспортног и других подсистема

[4] *Pdf (енгл. Portable document file) – универзални формат документа за преглед на рачунару*

[5] *HTML (енгл. Hyper Text Markup Language) – описни језик развијен ради креирања и описивања интернет страница*

производног система. Пре израде програма за *NUMA*[6] и другу производну опрему (роботе, транспортна средства и сл.) и пре коначног генерисања производне документације, потребно је извршити симулацију појединачних технолошких процеса, као и читавог производног процеса. *CAD/CAM* системи поседују веома добре функције за ту намену које кориснику омогућују уочавање неправилности у иницијално креираном производно-технолошком поступку. Циљ је да се евентуалне измене по почетку стварне производње у потпуности избегну, или да се сведу на најмању могућу меру. Током симулације *CAD/CAM* систем визуелно приказује све релевантне информације, посебно означавајући места могућих проблема и недостатака. Генерисање *G*-кôда, којим се врши рачунарско управљање производном опремом, у потпуности је аутоматизовано. То се изводи посебним функцијама *CAD/CAM* система, на основу геометријског и технолошког модела. Ово је веома важна функција *CAD/CAM* система и треба напоменути да се извршни *NC* програми односе и на другу производну опрему, као што су *NU* мерне машине, роботи и транспортна средства. Савремени *CAD/CAM* системи поседују веома моћне модуле за читав низ врста обрада, а нарочито су моћни они за обраду стругањем, глодањем, бушењем и електроерозијом. Ове модуле подржавају, углавном, све *CNC* управљачке јединице, па зато примена оваквог приступа моделирању обрадног процеса и користи које он пружа, најчешће не зависе од произвођача производне опреме (машина).

Структура *CAD/CAM* система

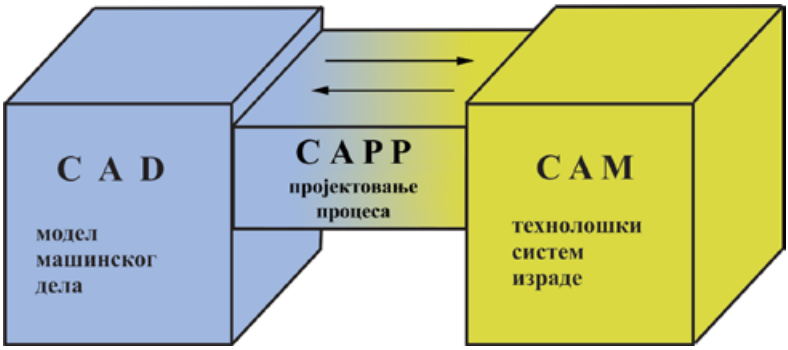
Структура *CAD/CAM* система садржи све елементе који су укључени у процес производње неког производа. Као што се види на слици 1.1, *CAD/CAM*, односно *CAD/CAPP/CAM* систем чине три основна модула:

1. ***CAD*** модул, који обухвата:
   - модел,
   - радионички и/или склопни цртеж,
   - каталог материјала,
   - техничка упутства и податке.

[6] *NUMA – Нумерички Уп̄рављана Машина Алат̄ка*

2. ***CAM*** модул, који садржи:
   - геометријски процесор,
   - технолошки постпроцесор,
   - каталоге алата,
   - каталоге помоћних прибора,
   - податке о изабраној машини, и друго.
3. ***CAPP***[7] систем, који представља скуп рачунарски подржаних активности које поједностављују рад пројектанта – технолога. *CAPP* је својеврсни мост између фазе пројектовања дела (*CAD*) и фазе пројектовања технологије за његову производњу (*CAM*). Он представља фазу пројектовања процеса за израду производа представљеног моделом. Ти процеси се потом у *CAM* фази претварају у технологију за израду тог производа.

За *CAD/CAM* систем веома битан *CAQ*[8] систем повезује рачунарско постизање квалитета обраде са елементима управљања квалитетом. Он представља све оне мере које се користе у оквиру компјутерски контролисане производње како би се обезбедило успешно спровођење осигурања квалитета. Подаци добијени мерењима се помоћу статистичких метода обрађују у оквиру *CAQ* система, чиме се проверава стабилност процеса производње (постојаност одржања квалитета).



Слика 1.1 *CAD/ CAPP / CAM систем [5]*

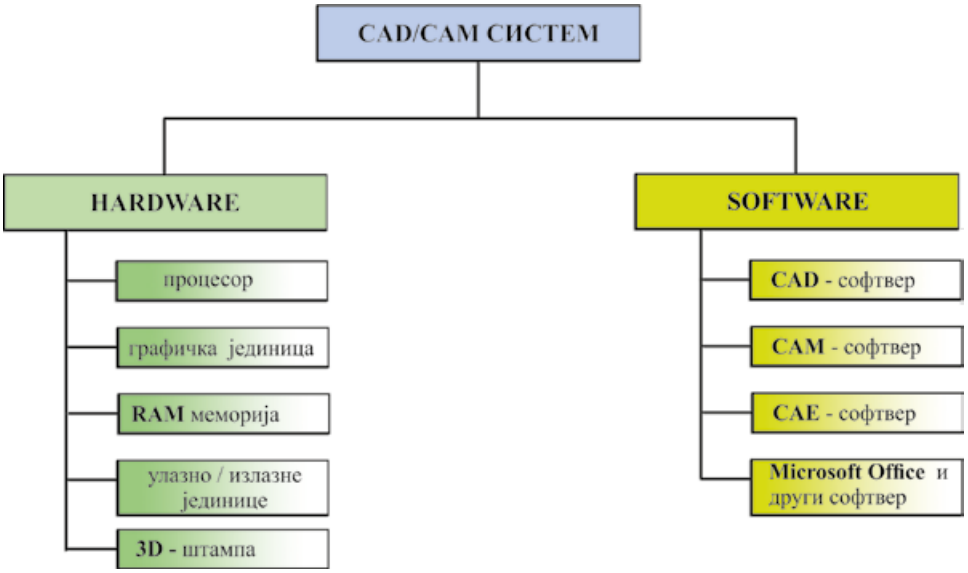
[7] *CAPP (енгл. Computer Aided Process Planning) – компјутерски подржано планирање процеса*
[8] *CAQ (енгл. Computer Aided Quality) – компјутерски подржано одржавање квалитета*

Основни задатак мерног система *CNC* машине, односно *CAQ* модула, јесте да брзо и прецизно измери одговарајуће померање извршних органа машине и да ту измерену величину у одређеном облику и на адекватан начин проследи управљачкој јединици. Како је управљачка јединица електронски уређај, то је потребно да се информација о измереној величини прикаже у облику електричног сигнала који може лако да се обради. Због тога се код *CNC* машина углавном користе електронски мерни системи, или системи који као излазну величину имају електрични сигнал. Мерни уређаји морају да раде у такозваном „*online*" режиму. То значи да измерену величину одмах шаљу у управљачку јединицу како би се она упоредила са задатом, јер се управљање изводи на основу разлике задате и остварене координате померања. При овој интеграцији остварује се веза између прикупљања података о квалитету процеса и управљања производним процесима на свим расположивим нивоима. Прикупљање информација о делу подразумева повезивање *CAM* модула са програмом за геометријско моделирање, односно *CAD* модула система. Ова веза се успоставља интеракцијом *CAQ* модула који дели информације добијене са мерних инструмената и сензора, са *CAD* и *CAM* модулима. Ове информације се потом лако имплементирају како у модел, тако и у управљачки програм за обраду на *CNC* машинама.

Компјутерски оријентисани процеси дизајнирања и производње захтевају специфичне типове хардвера и софтвера. Интерактивна манипулација облицима производа је кључ тог процеса. Из тог разлога, хардвер и софтвер који омогућавају интерактивну манипулацију елементима делова и склопова машинских производа представљају уједно и главне компоненте од којих се састоје *CAD/CAM* системи.

Графички елементи и уређаји, периферни уређаји за унос и излаз података уз већ стандардне компоненте персоналних компјутера чине хардвер за овакве *CAD/CAM* системе (слика 1.2).

Кључне софтверске компоненте представљају програмски пакети којима се може вршити манипулација и анализа облика машинских производа у складу са захтевима корисника и командама које им он задаје.



Слика 1.2 *Структура CAD/CAM система*

Хардверске компоненте

Као што је већ наглашено, у хардверске компоненте (енгл. *Hardware*) спадају графички елементи и уређаји, периферни уређаји који служе за унос и излаз података, као и остале компоненте које заједно чине склоп компјутера. Најбитнији елемент хардверског склопа чини графичка јединица (енгл. *Graphic unit*), од чије процесорске снаге и количине графичке меморије зависи квалитет и брзина обраде података, односно извршавања команди и исписа резултата тих команди у оквиру радног простора *CAD/CAM* система. Савремени *CAD/CAM* системи су прилично захтевни са стране процесорске снаге самог рачунара, његове графичке јединице и количине радне меморије (*RAM*[9] – меморија).

Улазне јединице које су повезане са *CAD/CAM* системима су уређаји за управљање њиховим функцијама и командама, компјутерски миш, графичка табла са оловком, тастатура и слични уређаји.

[9] *RAM (енгл. Random Access Memory) – слободна, радна меморија за смештање података покренутих програма и докумената; брише се након искључивања рачунара*

Излазне јединице су, поред монитора путем кога пратимо извршавање команди и функција у оквиру *CAD/CAM* система, монохроматски или колор штампачи, плотери и, у последње време све присутнији, *3D* штампачи. Излазне јединице омогућавају преношење садржаја (модела делова и склопова, техничке документације и других) на папир или друге медије, док се путем *3D* штампача добијају прототипови модела производа израђени са великом прецизношћу и од одговарајућег материјала. Брза израда прототипова (енгл. *Rapid prototyping*) је нарочито развијена у области медицине и машинства.

Софтверске компоненте

Као што је дефинисано раније у овом поглављу, сваки софтвер (енгл. *Software*) који се користи у циклусу производа да би се смањило време и трошак развоја производа, као и да би се повећала продуктивност и квалитет производа, може се класификовати као *CAD/CAM/CAE* софтвер. Специфично, главни *CAD* софтвер дозвољава дизајнеру да креира и манипулише обликом објекта интерактивно на монитору, и меморише сваку верзију у базу података на самом рачунару. Ипак, у општем случају, сваки софтвер који олакшава процес дизајна, може на одређени начин бити класификован као *CAD* софтвер. На пример, подешени апликациони програм за аутоматизацију дизајна неког специфичног дела или механизма такође се сматра *CAD* софтвером.

Са друге стране, *CAE* софтвер се користи да анализира геометрију дизајна, дозвољавајући дизајнеру да симулира и проверава како ће се производ понашати у раду. Типичан пример *CAE* софтвера је програм за анализу путем коначних елемената (*FEA*) који се користи да се израчунају елементи као што су стрес, деформација и пренос топлоте на делу неког склопа. Један од таквих програма је *ANSYS* производ истоимене компаније, која датира још од 1970. године. Облик који је креиран у оквиру *CAD* система се може користити за примене као што је генерисање путање за *NC* алат или тродимензионална анализа стреса, само ако је облик креиран у три димензије. Ово објашњава праксу дизајнера да почињу свој дизајн у три димензије користећи параметарско моделирање. Интегрисани системи обезбеђују *CAD/CAM* и *CAE* могућности преко својих опционих модула. Осим ових софтверских пакета, неколико софтверских алата за моделирање су постали

популарни пошто обезбеђују флексибилно окружење за моделирање које може бити прилагођено за сваку апликацију. Сваки специфични апликациони програм који укључује креирање и манипулисање тродимензионалним објектима може се склопити коришћењем само нужних алата за моделирање из базе података алата. Резултат овог приступа је компактан апликациони програм који је скројен прецизно према захтевима клијента.

Windows базирани *CAD/CAM* системи

Како је сазревало тржиште *CAD/CAM/CAE* софтвера, ствари су се радикално мењале. Архитекте, инжењери и произвођачи су се навикли на идеју да су им потребни моћнији софтверски програми, а не само алати за дводимензионално цртање. Они су почели да прижељкују разноврсни тродимензионални *CAD* систем који може подржати дизајн и водити од дизајна директно ка производњи, и то на рачунарским платформама које они могу приуштити тј. на стандардним *PC* рачунарима. До недавно, индустријске апликације су биле доминантне у коришћењу скупих *CAD* алата. Срећом, *PC* хардвер је последњих година постао невероватно брз и моћан, тако да су многе фирме које су развијале *CAD* софтвере почеле да производе добре софтверске производе који су користили јаке графичке могућности које је нудила *Windows* фамилија оперативних система на *PC* рачунарима. Ови производи имају следеће заједничке карактеристике.

Прво, развијени су користећи максимално могућности *Windows OS*-а и на тај начин њихов кориснички интерфејс је врло сличан осталим *Windows* апликацијама.

Друго, ове апликације имају могућности повезивања и уградње објеката (*object linking and embedding – OLE*), као и друге *Microsoft Office* апликације (*Word*, *Excel*, *Access*, *Project*, итд.). То значи да свака слика тродимензионалног дела или склопа креирана помоћу ових система може бити дељена са другим *Microsoft* програмима. Замислимо да користимо ову могућност да генеришемо упутство за руковање уређајем. То реализујемо са *copy&paste* могућностима у *Windows* базираним програмима тако што ћемо узети увећани (*exploded*) поглед на склоп из *CAD* система и налепити га на одговарајућу локацију у текст фајлу који креирамо и едитујемо неким програмом за обраду текста (на пример програм *Microsoft Word)*. Ова *OLE*

могућност је проширена, тако да чак можемо пребацивати и тро-димензионалне податке, што чини пренос података између различитих *CAD* система лакшим.

Треће, ови системи укључују коришћење приступа који се назива компонентна технологија (енгл. *component technology*), код које се бирају најбољи софтверски елементи из расположиве софтверске базе. Након тога, системски инжењер може повезати у једну целину оне технологије које су проверене и доказане, и фокусирати се на њихове могућности које директно олакшавају процес дизајна. На пример, систем инжењер развоја може користити *ACIS* од *Spatial Technology*-а, *Parasolids* од *Unigraphics Solutions*-а, или *Designbase* од *Ricoh*-а, као кернел за моделирање (софтвер за рад и манипулацију облицима у три димензије), а *Constraint Solver* од *D-cubed*-а за параметарски дизајн. На овај начин време и трајање развоја се може смањити, при чему ће се користити само оне могућности појединачних софтвера које директно олакашавају задатак дизајна. Неки системи такође користе програме развијене од других софтверских кућа за управљање базама података и за рад са једначинама кривих и површина.

Четврто, ови системи користе објектно оријентисану технологију, за коју треба разматрати три важна аспекта:

- у терминологији програмирања, објектно оријентисана технологија значи модуларизацију програма у складу са његовим различитим функцијама тако да се сваки модул може поново касније независно користити. Типичан програмски језик који подржава модуларно програмирање је *C++*. Са *C++* свака функција се може програмирати тако да делује као независна програмска јединица.
- објектно оријентисана технологија такође се може применити на интеракцију интерфејс система са корисником. Када систем има објектно оријентисани кориснички интерфејс, свака икона која представља неки алат програмира се да пропозна текућу ситуацију и одзив да га успостави када је изабрана. На овај начин, систем води корисника да дâ потребан улаз у програм. Ова технологија вођења помаже кориснику да се осећа много удобније и сигурније када ради са системом.
- објектно оријентисана технологија се такође користи за ефикасно меморисање података. У конвенционалним *CAD* системима, подаци

придружени са делом обично се меморишу у неколико фајлова: фајл за меморисање геометријског модела, други фајл за мрежу његове анализе коначним елементима, и још један фајл за путању *NC* алата, и слично. Међутим, уколико користимо објектно оријентисани приступ, сви подаци придружени делу се меморишу у један фајл. Заједнички подаци који су подразумевано меморисани у неколико фајлова код конвенционалних система, похрањују се само једанпут у објектно оријентисаном систему, што значајно смањује потребну меморију за податке.

Пето, *CAD* системи обезбеђују могућности или параметарског моделирања, или варијационог моделирања. Оба приступа дозвољавају кориснику да дефинише облик објекта користећи ограничења уместо да директно манипулише елементима облика. Једина разлика је у томе да ли се ограничења решавају секвенцијално или симултано. Дефинисање правоугаоника као два сета паралелних линија одвојених егзактним растојањима, јесте пример директног манипулисања елементима облика. Међутим, ако исти правоугаоник дефинишемо задајући ограничења као што су: вертикалност између суседних линија и растојање између паралелних линија, имамо пример дефинисања облика користећи ограничења. Многи системи који подржавају могућности параметарског или варијационог моделирања, подразумевају само евидентна ограничења као што је вертикалност (енгл. *perpendicularity*), и паралелност (енгл. *parallelism*) за иницијалну скицу објекта, да би минимизирали обим уноса од стране корисника. У овом случају, од корисника се захтева да унесе само димензије и дозвољено му је да промени облик мењајући вредност димензија. Тада ове могућности називамо моделирање вођено димензијом (енгл. *dimension-driven modeling*). Ово значи да је геометрија дела одређена димензијама дела, и да се његова геометрија може лако модификовати мењајући вредности димензија. У овим системима, корисник може такође назначити релације између димензија тако да се геометрија може модификовати док се међусобни односи задржавају. Ово је један од механизама који се може користити да се сачувају намере дизајнера као део финалног дизајна. Међутим, обезбеђивање свих ограничења која су потребна да се дефинише комплетна геометрија, може бити прилично тешко, нарочито за неки компликовани део. У овом случају, системи који подржавају параметарско и варијационо моделирање још увек траже више интелигенције да потпуно дефинишу дизајн дела. Коначно, данашњи *CAD/CAM/CAE* системи имају и подршку интернета за

колаборативни инжењеринг. Ова подршка дозвољава даљински лоциране кориснике да комуницирају о дизајну истог дела истовремено док дефинишу модел дела на својим екранима. Дизајнер може такође проверити део, упоређујући његов модел са оним које су дизајнирали други дизајнери. Да би се остварише све ове могућности, чување дела као документа у *VRML* (енгл. *Virtual reality modeling language*) односно *HML* формату је минимални захтев. У оквиру *Autodesk*-ове фамилије *CAD/CAM* софтверских пакета, програм *VAULT* се користи за реализацију колаборативног дизајна између чланова пројектног тима.

Савремени CAD/CAM системи

Савремени *CAD/CAM* системи пружају широк избор различитих приступа у пројектовању производа и технологија. Могући алтернативни приступи су: експлицитно, параметарско, варијантно и моделирање на бази типских облика (*Features*[10]).

Параметарско моделирање има корен у *CAD (3D* модел/*2D* цртеж) асоцијативности (измена у *3D* моделу доводи до измене у *2D* цртежу). Параметарско пројектовање има могућност контроле модела параметарски дефинисаним „водећим" димензијама, као и уводећи недимензиона геометријска и друга ограничења и релације (паралелност, управност и сл.). Параметар као информација која у потпуности одређује модел, протеже се кроз све нивое система, и савремени *CAD/CAM* системи имају двосмерну асоцијативност (измена параметра на неком нивоу – моделу изазива промену на свим осталим нивоима – моделима).

Развојем рачунарске опреме (хардвера и софтвера) последњих деценија створени су услови и могућности шире примене рачунара у инжењерским процесима: конструисању, пројектовању технологија и процеса обраде, вођењу и управљању производњом и обрадним системима, као и симулацији процеса и решавању техничких проблема са којима је у додиру савремени инжењер. Са тим циљем развијени су специјализовани програмски пакети који имају примену у подручју производног инжењерства (*CAPP/CAD/CAM*), где се тежи интегрисању послова конструкције (*CAD*),

[10] *Features – облици (основни састављни делови сваког ўуног модела)*

планирања процеса обраде (*CAPP*) и управљања обрадним системима тј. процесом израде (*CAM*). Главна карактеристика свих *CAM* софтверских пакета је графичка симулација путање алата у циљу бржег, једноставнијег и сигурнијег програмирања *CNC* машина.

Данашњи ниво развоја *CAD/CAM* технологије карактерише велики број програма различитих произвођача. Иако ови програми данас по својим карактеристикама и могућностима постају све сличнији међу собом, могућност ширег избора често представља додатни проблем за опредељење инжењера. Који софтверски пакет је оптималан у датим технолошким и фабричким условима, са аспекта техничких могућности које пружа корисницима, потребне хардверске платформе, цене лиценце и потребног нивоа информатичког знања као и начину на који се приступа и врши обликовање у *CAD/CAM* апликацијама, тешко је одредити.

ProEngineer омогућује лако прављење *3D* модела, како би могли реалистично визуализовати делове и склопове. Саставни елемент *CAD/CAM* програмског пакета *ProEngineer* је у њега интегрисани *CAM* модул *Pro NC,* који је одговоран за пројектовање технолошког процеса и генерисање извршног програма за израду производа.

CATIA је скраћеница од *Computer Aided Three-dimensional Interactive Application,* што у слободном преводу значи „*Интерактивни програмски пакет за тродимензионално дизајнирање и производњу подржану рачунаром*". Могућности *CATIA*-е су огромне, јер осим моделирања машинских делова омогућује њихово прорачунавање с обзиром на чврстоћу одабраних материјала, израду програма за *CNC* машине, симулацију обраде и низ других погодности важних у дефинисању одређеног производа и његовој изради.

Autodesk Inventor је софтверски производ компаније *Autodesk*, познате по свом програму *AutoCAD*. Овај *CAD* програмски пакет је првенствено намењен пројектовању у области машинске индустрије. За разлику од *AutoCAD*-а, *Inventor* је програмски пакет за параметарско, запреминско (енгл. *solid*) моделирање машинских делова и склопова, као и за генерисање техничке документације. Поред стандардних функција једног *CAD* програмског пакета, *Inventor* садржи модуле који омогућавају различита израчунавања и симулације. Један од додатних модула који значајно скраћују време пројектовања стандардних машинских делова (вратила, лежајева, зупчаника и слично) је програмски модул *Design Accelerator*. Настао

је интегрисањем софтвера *Mechsoft* у програмско окружење *Autodesk Inventor*-а. У оквиру *Design Accelerator*-а могуће је вршити прорачуне:

- толеранција;
- цилиндричних и коничних зупчаника;
- пужних преносника;
- вијчаних веза;
- лежајева;
- вратила;
- клинова;
- каишних и ланчаних преносника и других стандардних машинских елемената.

Имплементација *Design Accelerator*-а у *Inventor* омогућава да се прорачунати машински елемент аутоматски генерише у радном окружењу *Inventor*-а као *3D* модел, који се даље може додатно дорађивати по потреби и као такав користити у склоповима као било који моделирани елемент.

MasterCAM комбинује врхунске софтвере за моделирање са једним од најсвестранијих *CAM* програма којим се програмира технологија израде производа унутар неког од *CAD* програмских пакета. *MasterCAM* се имплементира у одговарајући *CAD* програмски пакет (као на пример *SolidWorks*) и из њега преузима готов *CAD* модел коме, потом, дефинише технологију обраде.

Један од најзаступљенијих *CAD / CAM* система, у данашње време, *SolidWorks / SolidCAM* нуди јединствена *2D* и *3D CAD* решења за машинско и електро пројектовање, као и решења за прорачуне, симулацију кретања алата и механизама, управљање техничком и технолошком документацијом и програмирање рада на *CNC* машинама. Ова два софтверска решења раде заједно, користећи исте изворне информације, што омогућује изванредну интерактивност на свим нивоима, јер се свака измена у било ком модулу, аутоматски имплементира кроз све остале модуле.

SolidWorks је оптимизован за рад како са геометријски једноставним деловима, тако и са великим конструкцијама (склоповима) и деловима сложене

геометрије. Напредни алати за дефинисање сложене геометрије и површина, креирање варијантних решења и фамилија производа, симулације кретања механизама и радних услова обраде, као и визуелизација идеја кроз израду филмских записа и фото-реалистичних приказа делова и склопова, омогућавају реализацију производа високе сложености.

SolidCAM је програм имплементиран у окружење *SolidWorks*-а, тако да с њим чини функционалну целину, чиме је на једном месту омогућио истовремено моделирање машинских делова, израду њихове техничке документације, све до израде технологије за обраду и генерисања извршног програма за управљање *CNC* машинама које тај део треба да израде.

Геометријски процесор означава *CAD* програмски пакет у оквиру кога се дефинише тродимензиони модел предмета обраде (на основу скице и/или радioничког цртежа). На основу израђеног модела у оквиру технолошког постпроцесора (*CAM* програм), коришћењем утврђеног технолошког поступка, каталога алата и помоћних прибора дефинише се извршни програм (Г-код). Овако генерисани програм се путем различитих меморијских медија уноси у меморију управљачке јединице *CNC* машине, која потом извршава задати програм и израђује жељени производ. Данашњи *CAM* системи, да би израдили *NC* програм, морају имати дефинисан постпроцесор који се израђује за сваку машину алатку посебно. Постпроцесор има функцију претварања излазне *CL* датотеке у *NC* датотеку у облику Г-кода.

Оно што представља изузетну погодност код *CAD/CAM* система јесте чињеница да се свака грешка која настане у процесу дефинисања програма за обраду може уочити у току симулације и верификације. Асоцијативност *CAD/CAM* система омогућава програмеру да редизајнира програм једноставним преправкама на било ком делу дефинисаних параметара обраде (алати, прибори, технологија, режими обраде и сл.), што ће се одмах одразити на резултујући програм за обраду. На овај начин се вишеструко скраћује време потребно за дефинисање и израду *NC* програма, исправљање евентуално уочених грешака и проблема, као и за смањење трошкова израде производа, избегавањем потребе за израдом пробних комада.