

Verifikacija softvera - Vežbe

Ivan Ristović

Ana Vulović

2022-10-10

Kolekcija materijala sa vežbi za kurs Verifikacija softvera na Matematičkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu.

Teme i alati radeni na vežbama:

- Debugovanje koristeći alate za debugovanje i razvojna okruženja
 - `gdb` - debugovanje koda na niskom nivou
 - `QtCreator` - debugovanje C/C++ kodova
 - `Intellij IDEA` - debugovanje Java koda
 - `Visual Studio` - debugovanje C, C++ i C# kodova
- Testiranje jedinica koda
 - Pisanje testabilnog koda
 - `QtTest` , `Catch` (C, C++)
 - `JUnit` (Java)
 - `xUnit` , `NUnit` (C#)
- Praćenje pokrivenosti koda testovima
 - `lcov` (C, C++)
 - `JaCoCo` (Java)
 - `dotnet-coverage` (C#)
- "Mock" testiranje
 - Pisanje *mock* klasa od nule (C++)
 - `Moq` (C#)
 - *Mock* testiranje baza podataka
- Profajliranje
 - `Valgrind` (memcheck, cachegrind, callgrind, hellgrind, drd)
 - `perf`
- Statička analiza
 - `KLEE`
 - `CBMC`
 - `Clang` statički analizator
- Alati i jezici za formalnu verifikaciju softvera
 - `Dafny`

Sadržaj

1	Debagovanje	3
1.1	QtCreator Debugger	3
1.1.1	Buffer Overflow primer (QtCreator)	3
1.2	gdb	5
2	Pisanje testabilnog koda	9
2.1	C++ primer - kalkulator	9
2.2	Java OOP primer - Game of Life	10
2.3	C# - REST API klijent primer	11
3	Testiranje jedinica koda metodom bele kutije	13
3.1	C++ - QTest, gcov, lcov	13
3.1.1	Pisanje testova jedinica koda pomoću QTest radnog okvira	13
3.1.2	Pisanje testova	14
3.1.3	Analiza pokrivenosti	14
3.1.4	Kreiranje izveštaja uz pomoć skripte	15
3.1.5	Integracija pokrivenosti u QtCreator	16
3.2	Java - JUnit, JaCoCo	16
3.3	C# (.NET) - xUnit, NUnit	21
3.3.1	xUnit	21
3.3.2	NUnit	23
4	Instalacije	24
4.1	Alati za debugovanje i razvojna okruženja	24
4.1.1	QtCreator	24
4.1.2	gdb	24
4.2	Alati/Biblioteke za testiranje jedinica koda i pokrivenosti koda	24
4.2.1	gcov, lcov	24
4.2.2	Gradle	24

1 Debagovanje

1.1 QtCreator Debugger

QtCreator dolazi sa debugger-om koji predstavlja interfejs između QtCreator-a i native debugger-a (gdb, CDB, LLDB, ...). Moguće je debugovati Qt aplikacije, ali i native C/C++ aplikacije, kačiti se na već pokrenute procese i formirati debug sesije, i mnogo toga.

Više informacija je moguće pronaći u Qt dokumentaciji.

1.1.1 Buffer Overflow primer (QtCreator)

Ukoliko debugujemo Qt aplikacije, dovoljno je pokrenuti aplikaciju u Debug modu. Pokrenuti QtCreator i otvoriti BufferOverflow.pro projekat. Prilikom otvaranja projekta, QtCreator će otvoriti konfiguracioni dijalog - konfigurisati projekat sa podrazumevanim podešavanjima.

Napomena: QtCreator podrazumevano uključuje `clang` statički analizator ukoliko je on dostupan. Iako nije neophodno, ukoliko želite da sami pronađete probleme u izvornom kodu a tek potom proverite svoje pronalaskе koristeći `clang`, isključite `clang` analizator u podešavanjima (`Edit -> Preferences -> Analyzer`).

Unutar QtCreator-a vidimo nekoliko pogleda (`Edit` , `Design` , `Debug` itd.). Trebalo bi da je `Edit` pogled već selektovan. Otvoriti `main.c` fajl i prodiskutovati o logici programa i njegovim slabim tačkama.

Unutar `Project` prozora možemo dodavati ili menjati postojeće konfiguracije za kompilaciju i pokretanje programa. To uključuje i dodavanje argumenata komandne linije (`Run` odeljak).

Pokrenuti debug sesiju. Isprobati debug akcije za kontrolisanje izvršavanja programa (`Debug` meni u glavnom meniju):

- `Interrupt`
- `Continue`
- `Step over`
- `Step into`
- `Step out`
- `Set/Remove breakpoint`

Možemo testirati ponašanje programa tako što prvo unesemo ispravnu lozinku `MyPassword` a zatim i proizvoljnu neispravnu lozinku (npr. `SomePassword`). Program se naizgled ispravno ponaša ali to ne znači da je u potpunosti ispravan.

Posmatrajući definicije promenljivih `password` i `ok` , možemo zaključiti da

će se one na steku naći jedna do druge. Proverimo da li je zaista tako: desnim klikom na promenljive u prozoru za prikaz promenljivih na steku selektovati opciju **Open Memory Editor -> ... at object address ...** . Nastaviti izvršavanje i primetiti inicijalizaciju memorije za promenljivu **ok** . Pošto je promenljiva **password** neposredno pre promenljive **ok** u memoriji, i pošto se sadržaj promenljive **password** unosi sa standardnog ulaza, ukoliko uspemo da pređemo granice promenljive **password** onda možemo upisati proizvoljnu vrednost u promenljivu **ok** (pa i **"yes"**)!

Posmatrajmo isečak koda:

```
scanf ("%s", password);
```

scanf nam ne garantuje da će učitati najviše **16** karaktera (koliko smo rezervisali za promenljivu **password**). Testirajmo ponašanje za niske dužine veće od 16 karaktera, npr. **WillThisPassNow?yes** . Vidimo da smo dobili privilegije iako lozinka nije ispravna.

Postavimo uslovni *breakpoint* nakon poziva **scanf** , da se program zaustavi ukoliko se promeni vrednost promenljive **ok** . Desnim klikom na **Breakpoint** i selekcijom opcije **Edit Breakpoint** možemo definisati uslov **ok != "no"** u **Condition** polju. Možemo takođe pratiti inicijalizaciju promenljive **ok** u **Memory Editor** -u. Nakon što se vrednost promeni, možemo je ručno vratiti na **"no"** .

Tok izvršavanja možemo pratiti i preko prikaza steka, odakle možemo videti redosled pozivanja funkcija. Konkretnu liniju u kodu koja je sledeća za izvršavanje, QT obeležava žutom strelicom levo od koda. Ukoliko se dogodi da smo mnogo napredovali i želimo da se pomerimo na neku ranije naredbu, dovoljno je da strelicu prevučemo na naredbu koja nam je potrebna, bez potrebe za ponovnim pokretanjem programa. Za ispekciju asemblerskog koda možemo otvoriti *Disassembler* prozor.

Ostaje pitanje - šta naš program radi ukoliko je lozinka toliko dugačka da prevazilazi veličinu steka (npr. **ThisPasswordSimplyExceedsMaximumLengthAvailableOnStack**)? Dobićemo poruku ***** stack smashing detected ***** . To je posledica opcije **gcc -a -fstack-protector** koja generiše zaštitnu promenljivu koja je se dodeljuje osetljivim funkcijama. Osetljivim se smatraju one funkcije koje koriste dinamičku alokaciju ili imaju bafere veće od **8B** . Zaštitna promenljiva se inicijalizuje pri ulasku u funkciju i proverava se na izlasku. Ukoliko provera ne bude tačna, štampa se prikazana poruka i program prekida sa izvršavanjem. Ukoliko želimo da učinom kod još ranjivijim na ovakve napade, možemo pomenutu zaštitu isključiti opcijom **-fno-stack-protector** . U slučaju Qt projekta potrebno je dodati ovu opciju u **QMAKE_CFLAGS** promenljivu. U definiciji projekta (datoteci ekstenzije **.pro**) uneti sledeći red a zatim pozvati **qmake** i izvršiti ponovno prevoženje projekta:

```
QMAKE_CFLAGS += -fno-stack-protector
```

Da bismo sprečili napade prekoračenjem bafera savet je da se primenjuju dobre programerske prakse i da se:

- preoverava upravljanje memorijom tokom programa koristeći neki od alata poput `valgrind` `memcheck`
- upotrebljava `fgets()` funkcije umesto `gets()` ili `scanf()` koje ne vrše provere granica promenljivih.
- upotrebljava `strncmp()` umesto `strcmp()` , `strncpy()` umesto `strcpy()` , itd.

1.1.1.1 Debugovanje spoljašnje aplikacije kroz QtCreator Ukoliko pokrenemo prethodni primer izvan QtCretor-a, to ne znači da ne možemo debugovati taj program. Štaviše, moguće je QtCreator debugger zakačiti za bilo koji program koji se izvršava ili će se tek izvršiti. Iz menija **Debug** biramo **Start Debugging** . Na raspolaganju su nam opcije:

- *Attach debugger to started application* - da bismo debugovali aplikaciju koja je već pokrenuta.
- *Attach debugger to unstarted application* - da bismo debugovali aplikaciju koja je će biti pokrenuta. Zadaje se putanja do izvršne verzije programa. Debugger će se aktivirati kada aplikacija bude pokrenuta.
- *Start and Debug External Application* - slično kao prethodno samo što će se program pokrenuti odmah. Možemo čekirati opciju da se doda tačka prekida na početak `main` funkcije.

Napomena: Ako QtCreator ne uspe da se poveže na proces, moguće je da treba da se dozvoli povezivanje na procese tako što se upiše `0` u fajl `/proc/sys/kernel/yama/ptrace_scope` .

Da bismo imali informacije o linijama izvornog koda koji odgovara programu koji se debuguje, potrebno je da taj program bude preveden sa uključenim debug informacijama (za `gcc` to je opcija `-g`). Inače, debugger će nam prikazivati memoriju kojoj pristupa program.

1.2 gdb

GNU Debugger (gdb) je debugger koji se može koristiti za debugovanje (najčešće) C/C++ programa. Preko gdb je moguće pokrenuti program sa proizvoljnim argumentima komandne linije, posmatrati stanje promenljivih ili registara procesora, pratiti izvršavanje kroz naredbe originalnog ili asembliranog koda, postavljanje bezuslovnih ili uslovnih tačaka prekida i sl. Više o gdb se može pročitati na ovom linku.

Koristeći gdb možemo učitati program iz prethodnog primera. U slučaju da želimo da ručno prevedemo program, neophodno je da se postaramo da je prosleđen `-g` flag `gcc` kompilatoru:

```
$ gcc main.c -g -o BufferOverflow
```

Pošto je QtCreator već preveo ovaj program i u `build-*` direktorijum ostavio izvršivi fajl, možemo ga direktno učitati u gdb:

```
$ gdb BufferOverflow
...
Reading symbols from BufferOverflow...
(gdb)
```

Alternativno, možemo program učitati u već pokrenuti gdb proces:

```
$ gdb
...
(gdb) file BufferOverflow
Reading symbols from BufferOverflow...
(gdb)
```

U slučaju da debug simboli nisu prisutni, možemo u definiciji projekta dodati odgovarajući flag (pod `QMAKE_CFLAGS`).

Spisak komandi koje gdb pruža možemo dobiti komandom `help` . Za sve ove naredbe postoje i skraćene varijante - npr. za `running` možemo kucati `run` ili samo `r` .

```
(gdb) help
List of classes of commands:

aliases -- User-defined aliases of other commands.
breakpoints -- Making program stop at certain points.
data -- Examining data.
files -- Specifying and examining files.
internals -- Maintenance commands.
obscure -- Obscure features.
running -- Running the program.
stack -- Examining the stack.
status -- Status inquiries.
support -- Support facilities.
text-user-interface -- TUI is the GDB text based interface.
tracepoints -- Tracing of program execution without stopping the program.
user-defined -- User-defined commands.
```

Tačke prekida možemo postaviti komandom `breakpoints` , aktiviramo/deaktiviramo komandama `enable` / `disable` , a brišemo komandom `delete` . Komandom `continue` nastavljamo rad programa do naredne tačke prekida. Tačke prekida mogu biti linije, npr. `main.c:15` ali i funkcije, npr. `main` ili `main.c:grant_privilege`

. Postavimo tačku prekida na funkciju `grant_privilege`, kontrolišimo izvršavanje programa naredbama `step` (nalik na *step into*) i `next` (nalik na *step over*):

```
(gdb) b main.c:grant_privilege
Breakpoint 1 at 0x1171: file ../01_buffer_overflow/main.c, line 5.
(gdb) r
Starting program: BufferOverflow
Breakpoint 1, grant_privilege () at ../01_buffer_overflow/main.c:5
5      {
(gdb) s
7          char ok[16] = "no";
(gdb) n
9          printf("\n Enter the password : \n");
(gdb) n

Enter the password :
10         scanf("%s", password);
(gdb) n
MyPassword12      if (strcmp(password, "MyPassword")) {
(gdb) info locals
password = "MyPassword\000\367\377\177\000"
ok = "no", '\000' <repeats 13 times>
(gdb) n
15             printf("\n Correct Password \n");
(gdb) n

Correct Password
16             strcpy(ok, "yes");
(gdb) n
19             if (strcmp(ok, "yes") == 0) {
(gdb) n
23                 printf("\n Root privileges given to the user \n\n");
(gdb) n

Root privileges given to the user

25     }
(gdb) finish
Run till exit from
#0  grant_privilege () at ../01_buffer_overflow/main.c:25
main () at ../01_buffer_overflow/main.c:43
43     return 0;
```

Komandom `info` možemo dobiti informacije o lokalnim promenljivim, registrima itd. (npr. `info locals` tj. `info registers`). Komandom `info breakpoints` možemo videti spisak tačaka prekida.

Alternativno, moguće je iskoristiti drugačiji korisnički interfejs, komandom `tui` npr. `tui enable` . Tako dobijamo pogled na izvorni kod na jednoj polovini korisničkog interfejsa. Komandom `tui reg` možemo dobiti i prikaz registara sa `tui reg all` .

Koristeći gdb možemo dodati i uslovne tačke prekida, npr.:

```
(gdb) b grant_privilege:12 if ok != "no"
```


2 Pisanje testabilnog koda

Da bismo efikasno pisali testove jedinica koda, neophodno je da kod pišemo tako da bude pogodan za testiranje, ali i da softver razvijamo tako da je moguće paralelno pisati testove. Jedan način da se obezbedi takav način rada je razvoj vođen testovima (engl. *Test-Driven-Development*, skr. *TDD*). U situacijama kada već imamo dostupan izvorni kod i treba da napišemo testove jedinica koda, treba znati kako pristupiti pisanju testova i kako refaktorisati kod tako da bude pogodan za testiranje. Nekada funkcije koje treba da testiramo nemaju deterministički izlaz tako da ih je nemoguće testirati u izvornom obliku.

U ovom poglavlju će biti reči o tehnikama za pisanje testabilnog i skalabilnog koda. Primeri na kojima će ove tehnike biti prikazane su pisani u raznim programskim jezicima ali su koncepti koje prikazuju univerzalni, kao npr. inverzija zavisnosti, zamena implementacije itd.

2.1 C++ primer - kalkulator

Naš kod za kalkulator je nepodesan za jedinično testiranje jer se mnogo posla zapravo obavlja u main funkciji. Da bismo sve delove testirali moramo kod izdeliti na funkcije koje obavljaju po jednu celinu. Već postoje funkcije za svaku pojedinačnu operaciju koje imaju dva argumenta, njih nećemo dirati.

U `main` funkciji test podaci se učitavaju sa standardnog ulaza i sve se ispisuje na standardni izlaz. Da bismo mogli u jediničnim testovima da zadajemo svoje ulaze, promenimo da funkcije ne učitavaju sa `std::cin` već sa proizvoljnog toka tipa `std::istream`, i da ispisuju ne na `std::cout`, već na proizvoljni tok tipa `std::ostream`. Na taj način ćemo izbeći učitavanje sa standardnog ulaza, a moći ćemo da unapred zadamo ulaz na kom se testira.

Iz tog razloga već postojećoj funkciji `showChoices` treba dodati argument `std::ostream & ostr` na koji će ispisivati ponudene opcije umesto na `std::cout`. Vidimo da se u `main` funkciji nakon prikaza opcije očekuje unos izbora operacije i proverava ispravnosti unetog podatka. Taj deo objedinjen izdvajamo u posebnu funkciju `readChoice` koja će pozivati funkciju `showChoices` i učitavati opciju sa ulaznog toka sve dok se ne unese jedna od ispravnih cifara.

Nakon toga bi trebalo da se unesu dva operanda nad kojima će se primeniti izabrana operacija. To se može izdvojiti u posebnu funkciju `readOperands` koja će učitati dva realna broja sa ulaznog toka. Primenu odabrane operacije na unete operande na osnovu izabrane opcije izdvajamo u posebnu funkciju `calculate`. U njoj ćemo proveriti da li je opcija validna, primeniti operaciju i vratiti rezultat. Ukoliko se ne pošalje dobra vrednost argumenta `choice` funkcija bi, npr., mogla da baci izuzetak tipa `std::invalid_argument` ili vrati vrednost `false`. Proveru možemo uraditi i sa `assert(choice >= 1 && choice <= 4);` iz `cassert` zaglavlja. Ukoliko se ne

pošalje očekivana vrednost za argument `choice` program će biti prekinut. Ovo nam je način da nametnemo važenje preduslova za funkciju. Istu proveru bismo mogli da stavimo i u `printResults` funkciju. Dobili smo funkcije koje rade nezavisne poslove. Time su potencijalno upotrebljive i za neku dalju upotrebu ili pisanje kompleksnijeg kalkulatora. Sada i `main` funkcija može izgledati jednostavno kao niz poziva ovih funkcija.

2.2 Java OOP primer - Game of Life

Program predstavlja implementaciju poznate ćelijske automatizacije pod imenom Game of Life. Početna konfiguracija igre (početno stanje table kao i veličina mreže) su konfigurabilni. Stanje igre se ispisuje na standardni izlaz nakon svake iteracije.

Da bismo pisali testove jedinica koda, moramo razumeti odnose klasa u okviru aplikacije:

- paket `app` sadrži implementaciju `GameOfLife` igre
- paket `model` sadrži implementacije klasa `Cell` i `Grid`, koje se koriste za reprezentaciju stanja igre
 - paket `model.conf` sadrži implementacije početnih stanja igre (nasumičnu i jednu unapred kreiranu sa specifičnim osobinama, pod nazivom `Glider`)

Testovi koje bismo voleli da napišemo bi testirali:

- da li se mreža ispravno kreira na osnovu konfiguracije
- da li se pravila igre ispravno primenjuju iz generacije u generaciju
- da li se stanje igre ispravno ispisuje na standardni izlaz

Testove da li se mreža ispravno kreira na osnovu konfiguracije možemo lako napraviti. `Grid` klasa već implementira sve neophodno. Jedini problem predstavlja to što nemamo način da ručno postavimo konfiguraciju koja će se koristiti kao početna. Možemo testirati nasumičnu konfiguraciju međutim radije bismo da imamo deterministične testove. Takođe, naši testovi bi idealno testirali konfiguraciju u specijalnim slučajevima, npr. ivice mreže, što ne možemo kontrolisati nasumičnom konfiguracijom. Možemo ručno promeniti stanje klase `Grid` nakon kreiranja ali testovi **nikada** ne treba da zalaze u detalje implementacije klase, tj. njihova stanja. Kreiranje ručnih determinističkih konfiguracija nam omogućava i testiranje pravila igre - možemo kreirati `Grid` objekat sa specifičnom konfiguracijom namenjenom da testira određeno pravilo igre ili kombinaciju više pravila, pozivajući metod `Grid.advance()` i testirati da li su se ćelije promenile onako kako bi trebalo. Zatim možemo testirati i specijalne slučajeve kao što su ivice mreže kao i situacije u kojima se na jednu ćeliju primenjuje više pravila.

Da bismo implementirali ručne konfiguracije, primetimo da je `model.conf.GliderConfiguration` jedna implementacija ručne konfiguracije. Možemo da implementiramo naše specifične konfiguracije na sličan način, međutim imali bismo ponavljanje koda pošto bi se jedino

menjao konstruktor klase. Apstrahujmo `GliderConfiguration` implementaciju - dodajemo klasu `ManualConfiguration` i menjamo klasu `GliderConfiguration` da nasleđuje klasu `ManualConfiguration`. Sada naše test konfiguracije mogu da instanciraju `ManualConfiguration` sa odgovarajućom konfiguracijom mreže, a takođe aplikacija može da se proširi dodavanjem novih predefinisanih konfiguracija.

Slično kao u kalkulator primeru, treba apstrahovati rad sa standardnim izlazom kako bismo mogli da testiramo prikaz stanja igre. Prikaz stanja se trenutno vrši u glavnoj klasi aplikacije, što takođe nije optimalno. Dodajmo `views` paket sa implementacijom `View` interfejsa koji predstavlja apstraktnu implementaciju prikaza aplikacije. Sada možemo kreirati implementaciju koja ispisuje stanje igre na proizvoljni izlazni tok (`PrintStreamView`) odnosno `System.out` ukoliko izlazni tok nije naveden. Logiku ispisa stanja igre pomeramo iz `app.GameOfLife` u `view.ConsoleView`.

2.3 C# - REST API klijent primer

Aplikacija je primer RESTful API klijenta koji prikazuje trenutnu temperaturu i dnevnu prognozu tako što kontaktira servis OpenWeather, tačnije njegov API server (*Napomena: pokretanje primera zahteva ključ koji aplikacija traži u fajlu `key.txt`*). Detalji funkcionalnosti ovog servisa nisu od značaja za razumevanje ovog primera. Pojednostavljeno, klijent će serveru poslati HTTP zahtev za odgovarajućim resursom (trenutna temperatura, prognoza, i sl.) i server će poslati objekat sa odgovarajućim informacijama serijalizovanim u JSON. Pogledajmo implementaciju:

- prostor imena `Common` sadrži klase koje se koriste za deserijalizaciju odgovora servera
- prostor imena `Services` sadrži klasu `WeatherService` koja će biti meta naših testova
- glavni prostor imena koristi `WeatherService` da prikaže trenutnu temperaturu i prognozu za odgovarajući upit

Da bismo pisali testove za klasu `WeatherService`, pogledajmo njen javni interfejs (to što su neke funkcije asinhronne nema uticaj na suštinu primera):

```
bool IsDisabled();
async Task<CompleteWeatherData?> GetCurrentDataAsync(string query);
async Task<Forecast?> GetForecastAsync(string query);
```

Metod `IsDisabled` može lako da se testira kreiranjem servisa bez ključa. Druge metode, međutim, nisu toliko jednostavne pošto u sebi rade više od jednog posla - kreiranje HTTP zahteva, slanje zahteva, primanje odgovora i deserijalizacija odgovora. Ukoliko bismo testirali ove metode bez ikakve izmene, onda bismo stalno slali HTTP zahteve servisu u našim testovima - što je sporo i nepovoljno. Štaviše, nemoguće je ovako testirati ponašanje naše implementacije u slučaju da server vrati nevalidan ili nekompletan odgovor. Čak i da možemo nekako rešiti sve te problema, ne možemo znati

unapred koje odgovore servera da očekujemo - temperaturu i prognozu ne možemo znati unapred. Možemo pokrenuti lokalnu instancu OpenWeather servera modificovanu za naše potrebe ali to nije optimalno rešenje. Oba ova problema (nedeterminističnost rada servisa i testiranje višestrukih funkcionalnosti jednog metoda) možemo rešiti tako što ručno ubrizgamo odgovor servera. Trenutna implementacija nam to ne dozvoljava, tako da hajde da je modifikujemo, ali ujedno i proširimo.

Pre svega, preimenujmo `WeatherService` u `OpenWeatherService` i apstrahujmo interfejs ove klase `IWeatherService`. Kontaktiranje servera možemo apstrahovati u logiku klase `WeatherHttpService`. U našim testovima, možemo koristiti implementaciju nalik na onu u klasi `TestWeatherHttpService`. Ne želimo da `OpenWeatherService` direktno koristi `WeatherHttpService` pošto nam to ne omogućava zamenu implementacije klase `WeatherHttpService` klasom `TestWeatherHttpService` u našim testovima. Stoga kreirajmo interfejs `IWeatherHttpService` koji će implementirati klase `WeatherHttpService` i `TestWeatherHttpService`. Sada klasa `OpenWeatherService` može da ima zavisnost na interfejs u konstruktoru (što dodatno omogućava druge povoljnosti kao što je ubrizgavanje zavisnosti).

3 Testiranje jedinica koda metodom bele kutije

Jedinični testovi (engl. *Unit tests*) treba da budu kreirani za sve **javne** metode klasa, uključujući konstruktore i operatore. Trebalo bi da pokriju sve glavne putanje kroz funkcije, uključujuću različite grane uslova, petlji itd. Jedinični testovi bi trebali da pokriju i trivijalne i granične slučajeve, kao i situacije izvršavanja metoda nad pogrešnim podacima da bi se testiralo i reagovanje na greške.

3.1 C++ - QTest, gcov, lcov

3.1.1 Pisanje testova jedinica koda pomoću QTest radnog okvira

QtCreator kao razvojno okruženje pruža mogućnost pisanja jediničnih testova. To je moguće učiniti pisanjem projekta tipa **Qt Unit Test** na više načina, u zavisnosti od toga da kako želimo da organizujemo stvarni i test projekat.

3.1.1.1 Uključivanjem biblioteke Prvi način kako možemo kreirati test projekat koji testira već postojeći projekat je tako što kreiramo novi projekat tipa **Qt Unit Test** :

```
New Project -> Other Project -> Qt Unit Test
```

Pošto želimo da pišemo testove za već postojeći projekat, treba da dodamo lokaciju projekta opcijom **Add Existing Directory** .

Unutar test projekta će se kreirati klasa koja nasleđuje **QObject** . Ispod modifikatora **private Q_SLOTS** pišemo bar jednu test funkciju. Trebalo bi da su nam već ponuđene funkcije npr. **testCase1()** .

Dodatno, postoje i četiri privatne metode koje se ne tretiraju kao test funkcije, ali će ih test radni okvir izvršavati bilo kada inicijalizuje ili čisti za celim testom ili trenutnom test funkcijom:

- **initTestCase()** će biti pozvana pre izvršavanja prve test funkcije
- **cleanupTestCase()** će biti pozvana nakon izvršavanja poslednje test funkcije
- **init()** će biti pozvana pre svakog poziva test funkcije
- **cleanup()** će biti pozvana nakon svakog izvršavanja test funkcije

Ukoliko se **initTestCase()** ne izvrši uspešno, nijedna test funkcija neće biti izvršavana. Ako **init()** funkcija ne prođe, njena prateća test funkcija se neće izvršiti, ali će se nastaviti sa sledećom.

3.1.1.2 Qt Subdirs projekat Drugi način da testiramo projekat je da kreiramo nov **Qt Subdirs** projekat u koji ćemo uključiti postojeći i novi **Qt Unit Test** projekat. Ovaj način organizacije je koristan ukoliko pišemo projekat od nule i želimo da

usput pišemo i testove.

3.1.2 Pisanje testova

QtTest radni okvir pruža makroe za testiranje, i neke od njih ćemo koristiti da testiramo naš kalkulator:

- `QCOMPARE`
- `QVERIFY`
- `QVERIFY_EXCEPTION_THROWN`

3.1.3 Analiza pokrivenosti

Uz `gcc` kompajler dolazi i `gcov` alat za određivanje pokrivenosti koda prilikom izvršavanja programa (engl. *code coverage*). Koristi se zajedno sa `gcc` kompajlerom da bi se analizirao program i utvrdilo kako se može kreirati efikasniji, brži kod i da bi se testovima pokrili delovi programa.

Alat `gcov` se može koristiti kao alat za profajliranje u cilju otkrivanja dela koda čija bi optimizacija najviše doprinela efikasnosti programa. Korišćenjem `gcov` -a možemo saznati koje su naredbe, linije, grane, funkcije itd. izvršene i koliko puta. Zasad lepše reprezentacije rezultata detekcije pokrivenosti koda izvršavanjem test primera, koristimo alat `lcov`.

Prilikom kompilacije neophodno je koristiti dodatne opcije kompajlera koje omogućavaju snimanje koliko je puta koja linija, grana i funkcija izvršena. Ti podaci se čuvaju u datotekama ekstenzije `.gcno` za svaku datoteku sa izvornim kodom. One će kasnije biti korišćene za kreiranje izveštaja o pokrivenosti koda.

```
$ g++ -g -Wall -fprofile-arcs -ftest-coverage -O0 main.cpp -o test
```

Alternativno:

```
g++ -g -Wall --coverage -O0 main.cpp -o test
```

Nakon izvršavanja test programa, informacije o pokrivenosti prilikom izvršavanja će biti u sačuvane u datoteci tipa `.gcda`, ponovo za svaku datoteku sa izvornim kodom. Pokrenimo alat `lcov` da bismo dobili čitljiviju reprezentaciju rezultata:

```
$ lcov --rc lcov_branch_coverage=1 -c -d . -o coverage-test.info
```

Opcija:

- `--rc lcov_branch_coverage=1` uključuje određivanje pokrivenosti grana, koje podrazumevano nije uključeno
- `-c` kreiranje pokrivenosti
- `-d .` koristi tekući direktorijum, jer u našem slučaju on sadrži potrebne `.gcda` i `.gcno` datoteke

- `-o coverage-test.info` zadaje naziv izlazne datoteke sa izveštajem koji treba da ima ekstenziju `.info`

Možemo neke datoteke isključiti iz analize pokrivenosti. Na primer, biblioteke jezika koje ne testiramo mogu nam samo zamagliti pokrivenost koja nas zanima - pokrivenost funkcionalnosti koje testiramo.

```
$ lcov --rc lcov_branch_coverage=1 \
  -r coverage.info '/usr/*' '/opt/*' '*.moc' \
  -o coverage-filtered.info
```

Opcija `-r coverage.info` uklanja iz prethodno dobijenog izveštaja `coverage.info` izvorne fajlove koji odgovaraju nekom od šablona koji su navedeni kao argumenti opcije.

Alat `lcov` ima podalat `genhtml` koji na osnovu prethodno generisanog izveštaja pravi `.html` datototeke za jednostavniji pregled. Potrebno je izvršiti naredbu:

```
$ genhtml --rc lcov_branch_coverage=1 -o Reports coverage-filtered.info
```

Opcija `-o Reports` određuje naziv direktorijuma koji će biti kreiran i popunjen generisanim `.html` dokumentima.

Izveštaj možemo otvoriti u Web pretraživaču, npr.

```
$ firefox Reports/index.html
```

Ukoliko ne obrišemo `.gcda` datoteke od prethodnih pokretanja programa, prikaz pokrivenosti će uključiti sve, zbirno.

3.1.4 Kreiranje izveštaja uz pomoć skripte

Postupak kreiranja izveštaja, nakon kompilacije programa se može automati zovati pokretanjem bash skripte `generateCodeCoverageReport.sh` :

```
$ ./generateCodeCoverageReport.sh . test data
```

Argumenti:

- `.` - Direktorijum u kom se nalaze potrebne `.gcda` i `.gcno` datoteke i izvršni program. U našem slučaju to je tekući direktorijum. Inače bismo navodili relativnu ili apsolutnu putanju do potrebnog direktorijuma
- `test` - Drugi argument treba da je naziv izvršne verzije programa koja će se pokretati.
- `data` - Naziv direktorijuma u koji će alati `lcov` i `genhtml` upisivati svoje rezultate. Ukoliko se ne navede, sve će se upisivati u tekući direktorijum skripta. Ukoliko navedeni direktorijum ne postoji, biće kreiran.

Skript briše `.gcda` datoteke od prethodnih pokretanja programa. Prikazana

pokrivenost je samo za poslednje pokretanje programa.

3.1.5 Integracija pokrivenosti u QtCreator

Ukoliko želimo da kreiramo pokrivenost koda prilikom izvršavanja postojećeg Qt projekta, potrebno je da definiciji projekta (fajl tipa `.pro`) dopišemo:

```
QMAKE_CXXFLAGS += -g -Wall -fprofile-arcs -ftest-coverage -O0
QMAKE_LFLAGS += -g -Wall -fprofile-arcs -ftest-coverage -O0

LIBS += \
    -lgcov
```

Opcije `-fprofile-arcs -ftest-coverage` i linkovanje sa `-lgcov` menja opcija kompajlera `--coverage`. Nakon pokretanja projekta, `.gcda` i `.gcno` datoteke i izvršivi program biće u direktorijumu gde se nalaze ostali artefakti prevođenja (podrazumevano u direktorijumu sa prefiksom `build_`). Izveštaj možemo potom napraviti prema ranije prikazanom postupku.

3.2 Java - JUnit, JaCoCo

JUnit je jedan od najpopularnijih radnih okvira za testiranje jedinica koda u programskom jeziku Java. Neke od osobina JUnit radnog okvira su jednostavnost pisanja testova uz bogat skup anotacija koje opisuju testove, kao i veoma velika podrška za najčešće situacije u procesu pisanja testova kao što su uslovno uključivanje/isključivanje testova na osnovu promenljivih iz okruženja, operativnog sistema, proizvoljnih predikata itd.

JUnit svoje artefakte isporučuje na Maven Central i moguće ga je uključiti u Maven (i Maven-kompatibilne) alate za prevođenje. U ovom primeru ćemo koristiti jedan drugi popularni alat za prevođenje pod imenom Gradle. Gradle koristi `build.gradle` fajl (slično kao što Maven koristi `pom.xml`) za definiciju projekta i zavisnosti, ali i podešavanja dodatka.

Kreirajmo novi projekat:

```
$ gradle init
```

Možemo u `build.gradle` dodati zavisnost za JUnit:

```
| dependencies {
|     ...
+ |     testImplementation "junit:junit:4.13"
| }
```

Za praćenje pokrivenosti koda, korišćićemo JaCoCo. JaCoCo možemo lako uključiti

u projekat dodavanjem niske `'jacoco'` u spisak dodataka za projekat i dodatno konfigurisati izveštaj koji JaCoCo pravi:

```
| plugins {
|     id 'java'
+ |     id 'jacoco'
| }
|
| ...
|
+ | jacocoTestReport {
+ |     reports {
+ |         xml.required = false
+ |         csv.required = false
+ |         html.outputLocation = layout.buildDirectory.dir('jacocoHtml')
+ |     }
+ | }
+ |
+ | check.dependsOn jacocoTestReport
```

Nakon ovoga možemo iskoristiti sledeće komande:

- `gradle build` - prevođenje projekta
- `gradle test` - pokretanje testova jedinica koda
- `gradle jacocoTestReport` - kreiranje izveštaja o pokrivenosti

Izveštaji o pokrenutim testovima i statusu izvršavanja se mogu naći u direktorijumu `build/reports/tests/test` u HTML formatu. JaCoCo izveštaj o pokrivenosti se može naći u direktorijumu koji smo naveli u `build.gradle` fajlu - `build/jacocoHtml`, takođe u HTML formatu, kao što smo naveli.

Pregled nekih od korisnih anotacija JUnit radnog okvira:

- `@Test` - Radni okvir će pokrenuti ovaj metod automatski prilikom pokretanja testova.
- `@TestFactory` - Metod koji generiše testove u vremenu izvršavanja. Najčešće se koristi da pokrene nasumične testove ili testove bazirane na spoljnim podacima.
- `@DisplayName` - Čini izveštaje čitljivijim tako što testovima daje navedeno ime.
- `@BeforeAll` / `@BeforeEach` - Izvršava metod pre svih odnosno svakog testa.
- `@AfterAll` / `@AfterEach` - Izvršava metod posle svih odnosno svakog testa.
- `@Tag` - Dodaje oznaku testu radi kategorisanja testova u svite, npr. `@Tag("fast")` dodaje test u svitu sa oznakom `"fast"`.
- `@Disabled` - Isključuje test metod iz radnog okvira.
- `@Nested` - Koristi se u unutrašnjim klasama najčešće radi definisanja redosleda kojim se pokreću testovi.

Primeri korišćenja JUnit anotacija, test metoda i metoda pretpostavki:

```
import org.junit.jupiter.api.*;
public class AppTest {
    @BeforeAll
    static void setup(){
        System.out.println("Executes a method Before all tests");
    }
    @BeforeEach
    void setupThis(){
        System.out.println("Executed Before each @Test method " +
            "in the current test class");
    }
    @AfterEach
    void tearThis(){
        System.out.println("Executed After each @Test method " +
            "in the current test class");
    }
    @AfterAll
    static void tear(){
        System.out.println("Executes a method After all tests");
    }
}
```

```
Assertions.assertAll("heading",
    () -> assertTrue(true),
    () -> assertEquals("expected", objectUnderTest.getSomething()
);
```

```
@TestFactory
Stream dynamicTests(MyContext ctx) {
    // Generates tests for every line in the file
    return Files.lines(ctx.testDataFilePath)
        .map(l -> dynamicTest("Test: " + l,
            () -> assertTrue(runTest(l))
        ));
}
```

```
@Test
void exampleTest() {
    Assertions.assertTrue(trueBool);
    Assertions.assertFalse(falseBool);
    Assertions.assertNotNull(notNullString);
    Assertions.assertNull(notNullString);
}
```

```

    Assertions.assertNotSame(originalObject, otherObject);
    Assertions.assertEquals(4, 4);
    Assertions.assertNotEquals(3, 2);
    Assertions.assertArrayEquals(
        new int[] { 1, 2, 3 },
        new int[] { 1, 2, 3 },
        "Array Equal Test"
    );
    Iterable<Integer> listOne = new ArrayList<>(Arrays.asList(1,2,3,4));
    Iterable<Integer> listTwo = new ArrayList<>(Arrays.asList(1,2,3,4));
    Assertions.assertIterableEquals(listOne, listTwo);
    Assertions.assertTimeout(Duration.ofMillis(100), () -> {
        Thread.sleep(50);
        return "result";
    });
    Throwable exception = Assertions.assertThrows(
        IllegalArgumentException.class,
        () -> throw new IllegalArgumentException("error message");
    );
    Assertions.fail("not found good reason to pass");
}

```

```

@Test
void testAssumption() {
    System.setProperty("prop", "foo");
    Assumptions.assumeTrue("foo".equals(System.getProperty("prop")));
}

```

```

@Test
@EnabledForJreRange(min = JRE.JAVA_8, max = JRE.JAVA_11)
public void test1()
{
    System.out.println("Will run only on JRE between 8 and 11");
}

```

```

@Test
@EnabledOnJre({JRE.JAVA_8, JRE.JAVA_11})
public void test2()
{
    System.out.println("Will run only on JRE 8 and 11");
}

```

```

@Test

```

```

@DisabledForJreRange(min = JRE.JAVA_8, max = JRE.JAVA_11)
public void test3()
{
    System.out.println("Will NOT run on JRE between 8 and 11");
}

```

```

@Test
@DisabledOnJre({JRE.JAVA_8, JRE.JAVA_11})
public void test4()
{
    System.out.println("Will NOT run on JRE 8 and 11");
}

```

```

@Test
@EnabledOnOs({OS.LINUX, OS.WINDOWS})
void onLinuxOrWindows() {
    System.out.println("Will run on Linux or Windows.");
}

```

```

@Test
@DisabledOnOs({OS.WINDOWS, OS.SOLARIS, OS.MAC})
void notOnWindowsOrSolarisOrMac() {
    System.out.println("Won't run on Windows, Solaris or MAC!");
}

```

```

@Test
@EnabledIf("myCustomPredicate")
void enabled() {
    assertTrue(true);
}

```

```

@Test
@DisabledIf("myCustomPredicate")
void disabled() {
    assertTrue(true);
}

```

```

boolean myCustomPredicate() {
    return true;
}

```

```

@Test
@EnabledIfEnvironmentVariable(named = "ENV", matches = ".*oracle.*")

```

```

public void executeOnlyInDevEnvironment() {
    return true;
}

[Test]
[DisabledIfEnvironmentVariable(named = "ENV", matches = ".*mysql.*")]
public void disabledOnProdEnvironment() {
    return true;
}

[Test]
[EnabledIfSystemProperty(named = "my.property", matches = "prod*")]
public void onlyIfMyPropertyStartsWithProd() {
    return true;
}

```

3.3 C# (.NET) - xUnit, NUnit

U okviru .NET ekosistema postoji bogat skup radnih okvira za testiranje jedinica koda. Neki od njih olakšavaju repetitivno pisanje testova ubrizgavanjem vrednosti u šablone testova (tzv. *teorije*), ili pružaju interfejs za pisanje testova navođenjem ograničenja. Primeri ovakvih radnih okvira koje ćemo razmatrati su xUnit i NUnit. Oba radna okvira podržavaju sve jezike u okviru .NET ekosistema (C#, F#, VB.NET, ...).

3.3.1 xUnit

Osim jednostavnog interfejsa za pisanje testova nalik na JUnit u programskom jeziku Java, gde se testovi markiraju odgovarajućim anotacijama (što je i slučaj u xUnit radnom okviru markiranjem metoda atributom `[Fact]`), jedna od najpopularnijih osobina xUnit radnog okvira je mogućnost pisanja *teorija* - šablona za testove. Umesto da pišemo isti skup pod-testova iznova i iznova za različite podatke (ili umesto da ih izdvajamo u funkcije), možemo zakačiti atribut ¹ `[Theory]`, a unutar atributa `[InlineData]` definisati podatke koji će biti ulaz za test:

```

public class ParameterizedTests
{
    public bool SampleAssert1(int a, int b, int c, int d)
    {
        return (a + b) == (c + d);
    }
}

```

¹Atributi u programskom jeziku C# su donekle ekvivalentni anotacijama u programskom jeziku Java. Za razumevanje primera nije neophodno duboko poznavanje koncepta atributa.

```

public bool SampleAssert2(int a, int b, int c, int d)
{
    return (a + c) == (b + d);
}

// Regular xUnit test case
// Sub-optimal (repeated asserts)
[Fact]
public void SampleFact(int a, int b, int c, int d)
{
    Assert.True(SampleAssert1(4, 4, 4, 4));
    Assert.True(SampleAssert2(4, 4, 4, 4));

    Assert.True(SampleAssert1(3, 2, 2, 3));
    Assert.True(SampleAssert2(3, 2, 2, 3));

    Assert.True(SampleAssert1(7, 0, 0, 7));
    Assert.True(SampleAssert2(7, 0, 0, 7));

    Assert.True(SampleAssert1(0, 7, 7, 0));
    Assert.True(SampleAssert2(0, 7, 7, 0));
}

// Regular xUnit test case
// No repeated asserts but requires a local method
[Fact]
public void SampleFact(int a, int b, int c, int d)
{
    Assert.True(PerformAsserts(4, 4, 4, 4));
    Assert.True(PerformAsserts(3, 2, 2, 3));
    Assert.True(PerformAsserts(7, 0, 0, 7));
    Assert.True(PerformAsserts(0, 7, 7, 0));

    void PerformAsserts(int a, int b, int c, int d)
    {
        Assert.True(SampleAssert1(a, b, c, d));
        Assert.True(SampleAssert2(a, b, c, d));
    }
}

// Using Theory and InlineData
// Optimal solution, replaces above patterns

```

```

[Theory]
[InlineData(4, 4, 4, 4)]
[InlineData(3, 2, 2, 3)]
[InlineData(7, 0, 0, 7)]
[InlineData(0, 7, 7, 0)]
public void SampleTheory(int a, int b, int c, int d)
{
    Assert.True(SampleAssert1(a, b, c, d));
    Assert.True(SampleAssert2(a, b, c, d));
}

// There exist special "InlineData" variants, for example "SqlServerData"
[Theory]
[SqlServerData("(local)",
               "TestDatabase",
               "select FirstName, LastName from Users")]
public void SqlServerTests(string FirstName, string LastName)
{
    Assert.Equal("Peter Beardsley", $"{FirstName} {LastName}");
}
}

```

Druga popularna odlika xUnit radnog okvira je jednostavna izolacija test metoda. To se postiže kreiranjem zasebne instance test klase za svaki test metod. Za razliku od drugih popularnih radnih okvira, xUnit ne daje interfejs za markiranje metoda sa ciljem pokretanja tog metoda pre ili posle jednog ili svih testova, već se na osnovu izolacije testova po instanci klase, piše čitljiviji kod koji u konstruktoru i destrukturu klase vrši odgovarajuću pripremu odnosno čišćenje pre odnosno posle pokretanja testova.

Primeri korišćenja xUnit radnog okvira su preuzeti iz zvaničnog repozitorijuma sa primerima i mogu se naći kao git podmodul u okviru repozitorijuma sa materijalima.

3.3.2 NUnit

Glavna odlika NUnit radnog okvira je model ograničenja (constraint model). Takav model u radnom okviru pruža samo jedan metod za implementaciju testova. Logika potrebna za testiranje se kodira u objektu ograničenja koji se prosleđuje toj metodi:

```

Assert.That(myString, Is.EqualTo("Hello"));
Assert.That(myString, Is.Not.EqualTo("Bello"));

```

Primeri korišćenja NUnit radnog okvira su preuzeti iz zvaničnog repozitorijuma sa primerima i mogu se naći kao git podmodul u okviru repozitorijuma sa materijalima.

4 Instalacije

4.1 Alati za debugovanje i razvojna okruženja

4.1.1 QtCreator

Instalirati QtCreator sa zvanične stranice. Alternativno, moguće je i instalirati ceo Qt radni okvir koji uključuje i QtCreator.

Za neke Linux distribucije je dostupan paket `qt<VERZIJA>-creator` .

4.1.2 gdb

Za većinu Linux distribucija je dostupan paket `gdb` . `gdb` je za neke distribucije deo paketa za razvoj (npr. `build-essential` za Ubuntu).

4.2 Alati/Biblioteke za testiranje jedinica koda i pokrivenosti koda

4.2.1 gcov, lcov

`gcov` dolazi podrazumevano uz `gcc` kompajler. Alat `lcov` je obično dostupan u okviru paketa sa istim imenom. Instalacija na Ubuntu distribuciji bi, na primer, izgledala ovako: `sudo apt-get install lcov`

4.2.2 Gradle

Da bi se Gradle instalirao, neophodno je na sistemu imati verziju JDK-a veću od 8. Gradle se potom jednostavno instalira kroz `gradle` za većinu popularnih Linux distribucija. Alternativno, moguće je preuzeti unapred spremne Gradle artefakte i ručno instalirati Gradle. Primeri pretpostavljaju da je izvršivi fajl (ili alias) `gradle` dostupan na `PATH` -u i pokreće Gradle alat.

Neobavezno za ovaj primer, za laku organizaciju u okruženju sa više različitih JDK verzija, može se koristiti alat SDKMAN. Gradle se može instalirati korišćenjem SDKMAN-a:

```
$ sdk install gradle <verzija>
```

Na primer:

```
$ sdk install gradle 7.5.1
```