Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

Генератор x86-64 кôда за МикроЈаву

дипломски рад

ментор
проф. др Драган Бојић
редовни професор

кандидат
Лазар М. Цветковић
127/2016

Београд, јул 2020.

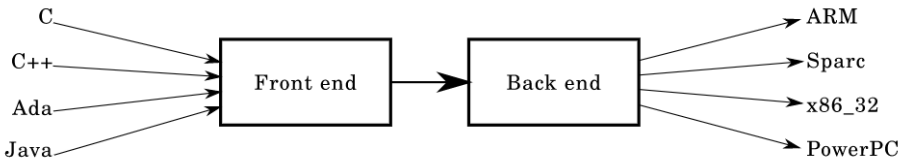
мајки Драгани, оцу Миљку,
дедама Владану и пок. Милораду,
бабама Љиљани и Смиљани,
што несебично подржаваше
мој рад протеклих година

Садржај

1. Увод

Основна тема и садржина овог рада јесте приказ концепата и практична реализација генератора кôда за x86-64 инструкцијски сет на основу МикроЈава програмског кôда. МикроЈава је едукативни програмски језик који се користи на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на курсу из програмских преводилаца. У питању је упрошћен објектно оријентисани језик са синтаксом сличној изворној Java-и који подржава готово све језичке конструкте које модерни програмски језици данас имају, конкретно, класе, наслеђивање, полиморфизам, и др. Погодан је као инструмент за учење програмских преводилаца услед своје једноставности, те се на основу овог знања могу правити компликованији преводиоци који су ближи ономе што се данас користи у пракси.

Данашњи програмски преводиоци коришћени у пракси се најчешће састоје из две грубе целине – front-end преводиоца и back-end преводиоца. Задатак првог јесте да генерише машински независан кôд (енгл. machine independent code) који треба да представља улаз у back-end део који генерише онда кôд за циљну архитектуру. Предност овакве архитектуре јесте што се не само један, већ више језика може сликати на такав међујезик и тиме је back-end независтан од front-end језика.



Слика 1 – шематски приказ преводиоца

У нашем случају, front-end компајлер ће имати задатак да изврши лексичку анализу, парсирање, семантичку анализу и генерисање међукôда (енгл. intermediate representation), док back-end има задатак да генерише x86-64 машински кôд.

Како је већ речено, међукôд се уводи као посебан међујезик који има задатак да апстрахује циљну архитектуру, и уведе независност од платформе. На нивоу међукôда врше се компајлерске оптимизације на нивоу појединачних пролаза. Стога је прилично јасно да међујезик мора да буде врло прецизно и унапред осмишљен. Примери међујезика јесу Common Intermediate Language у оквиру .NET Framework окружења, као и Java Bytecode.

Међујезик који ће бити коришћен и над којим ће се вршити генерисање асемблерског кôда биће заснован на троадресном кôду представљеном у виду четворки (енгл. quadruples). Основни принципи и алгоритми јесу детаљно описани у [ALSU06]. Наравно, сви концепти потребни за разумевање биће концизно изложени у каснијим поглављима овог рада.

По генерисању кôда за циљну машину он се води на улаз GNU Assembler алата који то треба да претвори у извршни фајл, а који је могуће извршити на циљној архитектури. Излаз овог преводиоца за МикроЈаву врши позив одређених функција у оквиру стандардне библиотеке језика C (енгл. stdlib) које врше улазно/излазне операције те је потребно претходно повезивање са статичким библиотекама које су такође предмет овог рада, а које ће бити поменуте у делу о генерисању кôда.

Целокупан изворни кôд имплементације преводиоца и овај дипломски рад, као и скрипте за покретање преводиоца биће јавно доступни у следећем Git репозиторијуму: https://github.com/cvetkovic/microjava_x64.

2. Кратак осврт на x86-64 архитектуру

Архитектура x86-64 је врло једноставна, али моћна 64-битна архитектура, компатибилна уназад са претходним стандардом x86 архитектуре, која је задржала подршку за 16-битне и 32-битне *legacy* програме. Развој ове архитектуре је био вођен потребама у индустрији, као и тражњом за високим перформансама. Прилично је увећан број регистара доступних програмеру, и то шеснаест 64-битних регистара опште намене (додато осам 64-битних регистара – r8-r15), као и шеснаест векторских регистара ширине до 512 бита. Инструкцијски сет ради у SIMD режиму кроз SSE екстензију инструкцијског сета. Такође, подржане су операције са покретним зарезом по IEEE-754 [AMD64_1]. Потребно је нагласити да се често мешају x64 и IA64 архитектуре. Друга представља 64-битну Itanium VLIW архитектуру коју су развили заједнички Intel и HP. У рачунарству високих перформанси x86-64 архитектура је последњих десетак година доминантно заступљена [TOP500].

Подржан је 64-битни виртуелни адресни простор, од којих се тренутно користе нижих 48 бита за адресирање, а што је у данашњим потребама апсолутно довољно. Остављен је простор за накнадно повећање коришћења додатних битова. Такође, величина адресе у физичком адресном простору је такође 48-бита. Омогућено је и релативно адресирање податка у односу RIP регистар, што побољшава ефикасност позиционо независног кода (енгл. position independent code), а који овај рад користи приликом генерисања извршног фајла.

Што се тиче асемблера архитектуре, мнемоници су двоадресног формата, где је леви операнд и имплицитни дестинациони операнд. Постоје инструкције које врше проширивање података у регистру његовим знаком на већу ширину (коришћено код инструкција дељења и за индексирање елемента низа). Присутне су и инструкције које врше условно извршавање, налик на оне код ARM архитектуре. Произвођачи процесора често подржавају и додатне инструкције за неке рачунски интензивне операције, попут AES алгоритма, те су процесори врло богати инструкцијама доступним програмеру, одн. преводиоцу, а који је често уско грло при експлоатисању оваквих могућности. Модерни процесори чак имају хардверски имплементиран генератор случајних бројева који може да се користи у криптографији.

Постоји више сигурносних режима – привилегија у којима процесор може да се налази у зависности какав кôд се извршава. Појединачни прстен (енгл. ring) представља поменути ниво привилегије. Често је подржана виртуелизација на нивоу хардвера. Процесорски стек може пуно да деградира перформансе, те се препоручује поравнање на 64-бита, а што је неопходно конвенцијом позивања при коришћењу CALL инструкције и повратка из процедуре инструкцијом RET. Регистар показивача стека указује на последњи додати податак, а стек расте од виших ка нижим меморијским адресама.

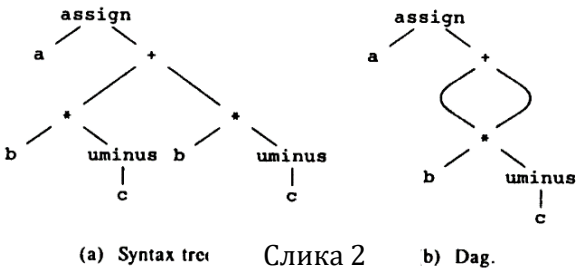
Аритметика са покретним зарезом је подржана и уграђена унутар процесора, и то са осам регистара (FPR0-FPR7). Подржан је рад у 32-битној, 64-битној прецизности, као и у проширеној 80-битној прецизности која је, услед тога што није подржана од већина преводилаца, доступна програмеру само у асемблеру. BCD аритметика је, такође, хардверски подржана.

3. Генерисање међукôда

Представа изворног кôда у виду међујезика има предност у погледу што је циљна машина идеализована и има бесконачну количину ресурса, док у случају реалне машине скуп ресурса је ограничен.

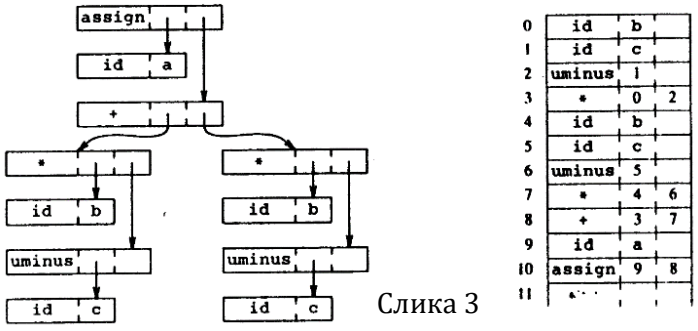
3.1 Представљање аритметичких израза

Ради ефикасне представе аритметичких израза у облику троадресног кôда потребно је најпре извршити њихову конверзију у погодан облик парсирањем израза и добијањем апстрактног синтаксног стабла, а онда и конверзијом стабла у облик усмереног ацикличног графа (енгл. directed acyclic graph - DAG). Разлог за ово јесте да се неки подизрази који су заједнички на нивоу аритметичког израза који се обрађује не би рачунали више пута (у десном примеру $b \cdot (-c)$), већ само једном. Тај међурезултат се сачува на некој меморијској локацији или у регистру.



Слика 2

Атрибутивно-транслациона граматика која омогућава овакво превођење је детаљно описана у [Boj11]. Ради ефикасне меморијске представе графа, сви чворови су смештени у хеш мапу зато што је операција претраге по чвору врло честа. Чворови се чувају као уређене тројке <op, l, r>, где је op – операција, l – леви син и r – десни син (+, *). У случају унарне операције (uminus), један од синова је *null* референца. Листови графа садрже само референцу на објектни чвор у табели симбола (a, b, c). Алгоритам за конструкцију графа је детаљно описан у [ALSU06].



Слика 3

3.2 Троадресни кôд

Троадресни кôд представља репрезентацију програма у коме се са десне стране знака наредбе доделе вишег програмског језика налази највише једна аритметичка операција. Увођење оваквог ограничења чини троадресни кôд врло погодним за генерисање и оптимизацију кôда за циљну машину.

У овом раду биће имплементиран троадресни кôд у виду четворки. Свака четворка се састоји од кôда операције, два аргумента и резултата. Аргументи су референце на објектне чворове табеле симбола. Такође, могуће су и унарне операције, те се један од аргумената тада изоставља. Поред четворки постоје и друге репрезентације у виду тројки, где је дестинациони операнд имплицитан, и имплицитних тројки. Важно је напоменути да су репрезентације у виду ацикличног усмереног графа описаног у претходном одељку и тројки еквивалентне у смислу аритметичких израза. Поред овога, постоје и индиректне тројке. Највећа предност четворки, иако заузимају више меморије, може да се види приликом оптимизовања кôда и то што је олакшано премештање инструкција унутар и ван базичних блокова.

3.3 Скуп инструкција међујезика

Једна од најбитнијих одлука приликом прављења програмских преводилаца јесте пројектовање инструкцијског сета међујезика. Такав језик мора да буде довољно близак циљном језику превођења, а са друге стране не сувише ниског нивоа јер се тиме отежава посао оптимизатору и генератору кôда. Такође, међујезик мора да има способност да подржи све програмске конструкте језике вишег нивоа. У наставку је дат опис минималног скупа инструкција међујезика који омогућава пресликавање свих конструката стандардне МикроЈаве на x86-64 асемблер.

	Инструкција	**Први аргумент**	**Други аргумент**	**Трећи аргумент**
аритметичке инструкције	ADD ***сабирање означених бројева***	операнд 1	операнд 2	резултат
	SUB ***одузимање означених бројева***	операнд 1	операнд 2	резултат
	MUL ***множење означених бројева***	операнд 1	операнд 2	резултат
	DIV ***дељење означених бројева***	операнд 1	операнд 2	резултат
	REM ***остатак при дељењу***	операнд 1	операнд 2	резултат
	NEG ***негација у другом комплементу***	операнд 1		резултат
рад са меморијом	LOAD ***читање из меморије***	адреса		одредиште
	STORE ***упис у меморију***	вредност за упис		референца
			PTR	адреса
	MALLOC ***динамичка алокација меморије***	објектни чвор класе		референца
			PTR	адреса
		број елемената низа	ARR	референца
	ALOAD ***читање елемента низа***	референца на низ	индекс	одредиште
	ASTORE ***упис у елемент низа***	вредност за упис	индекс	референца на низ
	GET_PTR ***дохватање адресе објекта***	референца класе	поље	одредиште
	STORE_PHI ***SSA φ-функција***	скуп SSA индекса		одредиште
рад са потпрограмима	PARAM ***прослеђивање параметра методе***	аргумент по вредности		
	CALL/INVOKE_VIRTUAL ***позив метода/вирт. метода***	име методе		
				одредиште
	ENTER ***припрема стека метода***	број бајтова за резервацију		
	LEAVE ***распремање стека методе и повратак контроле тока на позиваоца тренутне методе***			
	RET ***постављање повратне вредности методе***	повратна вредност		

	Инструкција	Први аргумент	Други аргумент	Трећи аргумент
I/O	SCANF ***читање са stdin***		%b, %c, %d	резултат
	PRINTF ***испис на stdout***	%b, %c, %d	вредност за испис	
контрола тока	CMP ***безусловни скок***	операнд 1	операнд 2	резултат
	JMP ***безусловни скок***			назив лабеле
	JL, JLE, JG, JGE, JE, JNE ***условни скок (<, ≤, >, ≥, ==, !=)***	резултат CMP инструкције	лабела за тачан услов	лабела за нетачан услов
	GEN_LAB ***генерисање лабеле***	назив лабеле		

Табела 1 –попис инструкција међујезика

3.4 Појам базичног блока

У циљу олакшања процеса оптимизације и генерисања кôда потребно је увести појам базичног блока који се дефинише као секвенца инструкција за које важе следеће чињенице:

- ако се изврши прва инструкција, онда се гарантовано извршавају и све оне након ње у оквиру тог блока,
- контрола тока напушта базични блок само у последњој његовој инструкцији.

Ситуација која може бити неодређена јесте шта се дешава ако се догоди изузетак или прекид негде у блоку. У суштини, ова чињеница је сасвим ирелевантна за дизајн програмских преводилаца јер се кôд дели у базичне блокове само да би се извршила његова оптимизација. Такође, инструкције позивања других процедура не дели базични блок као инструкције скока јер се гарантује повратак из процедуре и наставак секвенцијалног извршења кôда до прве следеће инструкције скока.

3.5 Препознавање базичних блокова

Алгоритам поделе кôда процедуре на базичне блокове укључује проналажење инструкција вођа (енг. *leaders*) које представљају прву инструкцију у оквиру базичног блока, а онда након тога и проналажење и последње, која је инструкција пред следећег вођу. Базични блокови представљају чворове графа контроле тока (енг. *control flow graph*), док су гране представљене листом следбеника базичног блока. За конструисање графа контроле тока потребно је додатно прилагодити наведени алгоритам, а што није предмет овога рада.

3.6 Одређивање информација о живости

Једна од корисних поступака приликом откривања базичних блокова унутар неког сегмента програмског кôда јесте и прикупљање информација о живости променљивих. Начин на који може да се одреде информације о живости биће детаљно објашњен, али је пре тога потребно увести дефиницију.

Дефиниција 1:

Нека троадресна наредба врши доделу променљивој x. Ако наредба j садржи x као један од својих операнада, и контрола тока може да тече од i ка j тако да између њих нико

други не врши доделу над x, тада кажемо да наредба j користи вредност променљиве x додељену у i, а за променљиву x кажемо да је жива у наредби i.

Алгоритам 1:

Нека је B базични блок троадресних наредби, и нека су све непривремене променљиве унутар базичног блока иницијално означене као живе, а привремене као мртве. Крећући се од последње ка првој наредби i: $x = y + z$ у базичном блоку B, урадити:

(1) доделити наредби i информације о живости из претходне итерације,
(2) поставити да променљива x није жива и да нема слеће коришћење,
(3) поставити да су променљиве y и z живе, и да је следеће њихово коришћење у i.

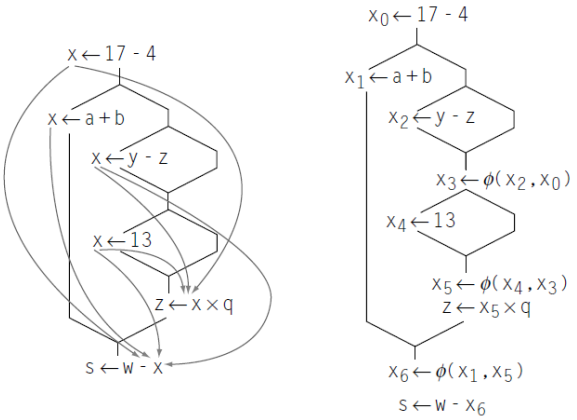
Процедура је иста и за троадресне наредбе које су облика $x = +y$ и $x = y$, а кораци (2) и (3) није могуће заменити јер x може бити y или z. Такође, потребно је напоменути да преводилачка оптимизација која ради елиминацију мртвог кôда није исто што и одређивање живости.

3.7 Static Single Assignment форма

SSA форма (енгл. Static Single Assignment Form) је облик међујезика који има особину да се свакој променљивој само једном може доделити вредност и да се свака променљива мора дефинисати пре коришћења.

Разлог за увођење SSA форме је тај што су њена претходно поменута својства прилично погодна у преводилачким оптимизацијама, а многи пролази не би могли ни да се дефинишу или би били исувише сложени преко *use-def* ланаца ако међујезик није у SSA облику.

SSA форма у међујезик уводи Ф-функције које као аргументе имају SSA имена која се односе на гране које улазе у посматрани базични блок. Ф-функција има за циљ да више различитих променљивих упише у једну променљиву, не водећи рачуна из које гране графа контроле тока је преузета контрола тока. Ф-функције немају еквивалент у асемблерском језику и не извршавају се на машини, али се представљају у међујезику равноправно са другим инструкцијама. У имагинарном емулатору који би имплементирао такав међујезик у SSA форми све Ф-функције унутар једног базичног блока би требале да се извршавају истовремено. Ф-функцију треба уметнути у међукôд тамо где се спајају више путања графа контроле токе. Алгоритми за претварање међујезика у SSA форму, као и за враћање из SSA у нормални облик биће предмет следећег поглавља.



Слика 4 – фрагмент међукôда у нормалној форми са означеним use-def chains (лево) и SSA форми (десно)

4. Оптимизатор кôда

Ово поглавље је додатак на дипломски рад, и представља пројекат на мастер академским студијама на курсу Програмски преводиоци 2 на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. У даљем тексту биће описано генерисање SSA форме, као и следећи оптимизациони пролази: local value numbering, function inlining, оптимизовање графа контроле тока, откривање неиницијализованих променљивих, измештање кôда из петље, као и елиминација мртвог кôда.

4.1 Local Value Numbering

Local Value Numbering (у даљем тексту LVN) је локална оптимизација која има за циљ да оптимизује сложене аритметичке изразе унутар једног базичног блока и замени их еквивалентним. Ова оптимизација обједињује елиминацију заједничких подизраза (енгл. common subexpression elimination), као и рачунање израза у време превођења (енгл. constant folding). Оптимизација подржава комутативност сабирања и множења, а такође се једноставно имплементира и упрошћавање израза еквивалентним алгебарским идентитетима.

Постоји и генерализована оптимизација под називом Global Value Numbering која ради све исто што и LVN, али на глобалном нивоу, тј. на нивоу читаве функције, а све уз помоћ SSA форме. Битно је напоменути да LVN не ради пропагацију константи унутар базичног блока, већ само у оквиру једног аритметичког израза, те се препоручује да се покреће заједно са пролазом који пропагира константе, све док постоје промене у базичном блоку.

Алгоритам оптимизације није нарочито сложен. Најпре је потребно све променљиве које се користе или су дефинисане у базичном блоку убацити у хеш табелу. Након тога је потребно проћи кроз сваку инструкцију унутар блока и дохватити операнде инструкције из хеш табеле, а онда и вршити претрагу хеш табеле по уређеној тројки $(op\_code, arg1, arg2)$. Ако су оба операнда константе може се одрадити њихово рачунање у време превођења и пропагација унутар израза. У случају постојања уноса у хеш табели по наведеном критеријуму се инструкција која се обрађује може обрисати, а сва појављивања њеног дестинационог аргумента заменити вредношћу прочитаном из хеш табеле. У супротном, треба само додати нову тројку у хеш табелу.

Инструкције које не треба обрађивати јесу све инструкције скока, инструкције позива функције, GET_PTR, MALLOC. Инструкције које раде са низовима су врло специфичне и захтевају посебан третман из разлога који је детаљно описан у [ALSU06]. Овде је усвојен конзервативни приступ да се оне не могу оптимизовати.

4.2 Function Inlining

Function inlining представља оптимизацију која на месту позива неке функције врши замену инструкције позива целокупним кôдом функције која треба бити позвана, а све у циљу елиминације кашњења које уноси позив, а по цену просторне експанзије кôда. Која функција може бити предмет оптимизовања, а која не, јесте тешко питање, и зависи од тога шта преводилац жели да постигне самом оптимизацијом. Најчешће се ради уметање малих функција, које немају процентуално више од 10% броја базичних блокова у односу на функцију у коју она треба да буде уметнута. Виртуелне методе не могу бити предмет оптимизације, осим у случају када се у време превођења може открити која ће функција стварно бити позвана (класа која садржи ту методу није родитељска класа ни једној другој класи), али тада таква метода суштински и није виртуелна.

Алгоритам се разликује од међујезика до међујезика, а за међујезик који смо ми овде предложили алгоритам се најпре своди на проналажење функције детета која може бити уметнута у функцију родитеља. Потом су кораци следећи:

1) Одредити који параметри требају да буду прослеђени детету, односно треба пронаћи све одговарајуће PARAM инструкције које се односе на позив који се обрађује;
2) Поделити базични блок који садржи позив који се оптимизује у родитељској функцији на два базична блока – један са инструкцијама пре позива, и други који садржи инструкције после позива;
3) Клонирати граф контроле тока функције детета, са свим одговарајућим унутрашњим структурама (енгл. deep copy), а потом и одредити јединствени улазни и излазни блок клонираног графа;
4) Ажурирати ENTER инструкцију у родитељу тд. алоцира довољно простора стеку;
5) Уградити клонирани граф контроле тока у родитељски граф контроле тока превезивајући показиваче наследника и претходника на одговарајући начин;
6) Обрисати CALL инструкцију из родитеља, као и ENTER и LEAVE инструкције из детета, а све RETURN инструкције у детету заменити са STORE инструкцијама;
7) Додати скокове из графа родитеља у граф детета, и обрнуто;
8) Све PARAM инструкције у родитељу заменити са одговарајућим STORE инструкцијама.

После извршавања горе наведеног алгоритма, граф контроле тока родитеља ће бити измењен, па је потребно поново одредити релације доминације, а треба доделити и адресе на стеку свим новододатим променљивама из детета. Такође, пошто ће функција која се уграђује бити уграђена на сваком њеном позиву, не треба генерисати посебни асемблерски кôд за њу, јер она никад у ствари неће ни бити позвана.

4.3 Оптимизовање графа контроле тока

Након покретања сваке од оптимизација која мења граф контроле тока потребно је извршити оптимизовање графа контроле тока. У ту сврху је имплементиран пролаз који најпре ради брисање свих блокова које немају ни једног претходника, тј. оних који су недостижни. Потом се на *postorder* обиласку графа контроле тока покреће алгоритам који треба да елиминише празне, а достижне блокове, изврши фузију два блока у један, као и да замени све условне скокове безусловним тамо где је то могуће. *Postorder* обилазак даје боље перформансе алгоритма [KCLT12].

Алгоритам ради тако што сваки условни скок код којег су обе дестинационе лабеле исте мења безусловним скоком, притом бришући непотребну CMP инструкцију и превезивајући показиваче. Пошто се по предложеном међујезику сваки блок завршава или условним или безусловним скоком, са изузетком излазног базичног блока, у *postorder* обиласку сваки базични блок који је празан се може избацити и тада је потребно превезати показиваче претходника и наследника избаченог блока. Исто тако, ако су два базична блока суседна и важи да је други претходник првог, а други има само једног претходника, тада они могу да се споје у један базични блок. Алгоритам треба понављати све док постоји промена у топологији графа контроле тока.

После извршавања наведеног алгоритма, граф контроле тока ће бити измењен, па је потребно поново одредити релације доминације.

4.4 Релације доминације

Доминатори су један од фундаменталних концепта теорије графова који се користи у науци о програмским преводиоцима. Нарочито су заступљени у алгоритмима за глобално оптимизовање кôда, где су готово неизоставни део.

Дефиниција: Чвор d доминира (енгл. dominates) чвором n ако сваки пут од улазног чвора до n пролази кроз d.

Алгоритам: Нека је n_0 улазни чвор у графу контроле тока, а $preds(n)$ скуп непосредних претходника чвора n. Доминатори чвора n се добијају као максимално решење следеће dataflow једначине:

$$Dom(n) = \begin{cases} \{n\} & , n = n_0 \\ \{n\} \cup \bigcap_{p \in preds(n)} Dom(p) & , n \neq n_0 \end{cases}.$$

Дефиниција: Чвор d стриктно доминира (енгл. strictly dominates) чвором n ако d доминира n и $d \neq n$.

Дефиниција: Чвор M непосредно доминира (енгл. immediately dominates) чвором N ако и само ако важи:

$$M\ sdom\ N \Leftrightarrow (\forall P)((P\ sdom\ N) \Rightarrow (P\ dom\ M))$$

Дефиниција: Dominance frontier (скр. DF) скуп чвора d је скуп свих чворова n_i таквих да d доминира непосредним претходником n_i, али d стриктно не доминира n_i.

Dominance frontier скуп чвора n се алгоритамски може одредити тако што се најпре одреди скуп $DF_{local}[n]$, па $DF_{children}[n]$, а онда одреди и њихова унија. Први скуп садржи чворове који за које важи $DF_{local}[n] = \{y \mid y \in succ(n) \wedge idom(y) \neq n\}$, док се други скуп одређује *postorder* обиласком доминаторског стабла и налажењем свих елемената који задовољавају $DF_{children}[n] = \{w \in DF[c] \mid (dom(n) \notin w) \vee (n = w)\}$, где је c чвор доминаторског стабла.

Неформално речено, непосредни доминатор чвора n је последњи стриктни доминатор на било којој путањи од улазног чвора до n. Скуп $DF[n]$ неког чвора n представља скуп чворова наследника чвора n којима чвор n не доминира. Све горе наведене релације могу да се одреде на обрнутом графу контроле тока и тада се говори о релацијама постдоманиације (енгл. postdominance) или реверзне доминације (енгл. reverse dominance).

4.5 Детекција петљи

Дефиниција: Природна петља (енгл. natural loop) је најмањи скуп чворова који има јединствени улазни базични блок – заглавље петље (енгл. loop header), повратну грану (енгл. back edge) и који садржи базичне блокове који немају претходнике ван тог скупа, осим у случају заглавља петље.

Дефиниција: Петља B је угњеждена у петљу A ако важи да је $B \subset A$, где су A и B скупови чворова графа контроле тока који чине петљу A и B, респективно.

Алгоритам за откривање природних петљи није нарочито компликован и састоји се од проналажења доминаторских релација у графу контроле тока, идентификовању повратних грана и одређивању скупа чворова који су део петље. Грана $t \rightarrow h$ је повратна

грана графа контроле тока ако важи да $h\ dom\ t$. Овај услов је потребно тестирати приликом обиласка графа контроле тока по дубини. Одређивање скупа чланова петље се ради тако што се у скуп најпре дода заглавље петље (чвор h), а онда се додају сви претходници чвора t уназад. Пошто је чвор h првобитно био већ у скупу, гарантује се завршетак алгоритма.

4.6 Генерисање SSA форме

По одређивању релација доминације може се приступити генерисању SSA форме. Алгоритам се састоји из две фазе: фазе уметања Ф-функција и фазе преименовања променљивих.

Алгоритам за уметање Ф-функција није нарочито сложен. Потребно је најпре одредити скуп базичних блокова у којем се врши упис у сваку променљиву. Потом се за сваки базични блок B у којем је вршен упис у променљиву (објектни чвор) умеће Ф-функција у сваки базични блок који припада *dominance frontier* скупу блока B. Притом је потребно водити рачуна да се Ф-функција која уписује у исту променљиву не дода два пута у исти базични блок. Сваки блок који припада скупу *dominance frontier* скупа B се додаје у ред за обраду, и тако док има промена.

Преименовање променљивих се ради тако што се дефинише бројач за сваки објектни чвор, а који служи за јединствено идентификовање сваког новог уписа у тај чвор, а такође се и за сваки објектни чвор дефинише стек са којега ће у суштини да буде дохватан индекс којим променљива треба да се преименује. Преименовање почиње од кореног чвора доминаторског стабла. Анализира се свака инструкција у оквиру посматраног базичног блока, и то тако што се аргументи сваке инструкције преименују вредношћу са врха стека, а сваки упис инкрементира бројач објектног чвора и додаје бројач на стек, наравно уз преименовање дестинационе променљиве. Потом се врши преименовање аргумената Ф-функције директних наследника посматраног базичног блока вредношћу са стека, а онда се врши рекурзивни позив функције за преименовање над свом децом посматраног базичног блока у доминаторском стаблу. По повратку из преименовања деце, потребно је скинути са стека све променљиве које су биле додаване у текућем позиву. Битно је водити рачуна да колико се дода на стек, толико мора да се скине са стека.

4.7 Откривање неиницијализованих променљивих

Поједини програмски језици захтевају да свака променљива пре коришћења буде иницијализована, иначе се не гарантује семантичка исправност програма, јер променљива бива иницијализована недетерминистички, заосталом вредношћу у меморији. Откривање неиницијализованих променљивих може да се ради на два начина: уз помоћ SSA форме и решавањем скупа *dataflow* једначина (анализа живости на улазу и излазу базичног блока).

Откривање неиницијализованих променљивих путем SSA форме је много једноставније него решавањем скупа *dataflow* једначина, иако је конструкција SSA форме скупа и комплексна операција. Променљива у SSA форми је неиницијализована ако било који базични блок посматране функције садржи инструкцију чији један од аргумената има SSA индекс нула, или Ф-функција референцира променљиву чији је SSA индекс нула. Ово представља врло једноставан критеријум, али стриктно захтева постојање минималне SSA форме. Уколико генератор SSA форме не генерише минималну SSA форму, тада је потребно покренути *mark* део алгоритма елиминације мртвог кôда и онда треба посматрати само означене Ф-инструкције.

Параметри функција не могу бити неиницијализовани, јер се њима вредност додељује током извршавања. Глобалне статичке променљиве такође не треба анализирати, јер се за њих простор алоцира асемблерским директивама уз предефинисање садржаја меморије, а такође не треба анализирати ни привремене променљиве јер су оне имплицитно у SSA форми.

4.8 Измештање кôда из петље

Измештање кôда из петље (енгл. loop invariant code motion) је глобални оптимизациони пролаз који има за циљ да све инструкције чији аргументи не зависе од инструкција унутар петље избаци у преамбулу петље (енгл. loop preheader), и тиме елиминише поновна израчунавања идемпотетних операција. Може се имплементирати на два начина: преко SSA форме или анализом живости. Овде ће бити коришћена SSA варијанта алгоритма.

Алгоритам ради тако што тражи инструкције које задовољавају поменути услов, а онда их пребацује у преамбулу петље. Не треба посматрати SCANF, PRINTF, PARAM, CALL, INVOKE_VIRTUAL, GEN_LABEL, CMP, STORE_PHI инструкције унутар петље. Ипак, не може свака пронађена инструкција да буде премештена у преамбулу петље, јер семантика може да буде нарушена. Инструкција кандидат мора да задовољи следећа три услова:

1) базични блок из ког се инструкција премешта мора да доминира блоком којим се излази из петље (онемогућава елиминисање инструкције из if-then-else структуре);
2) променљива у коју инструкција-кандидат уписује је дефинисана само једном у петљи (онемогућава елиминисање инструкције из if-then структуре). Овај услов је увек задовољен када се ради са SSA формом;
3) променљива у коју инструкција-кандидат уписује није у LiveOut скупу заглавља петље (онемогућава елиминисање инструкције ако се њен резултат користи у if-then-else структури); Код SSA форме овај критеријум се своди да ни једна Ф-функција у заглављу петље не референцира резултат инструкције-кандидата. Најконзервативнија варијанта је да ни једна Ф-функција унутар петље је не референцира.

После извршавања наведеног алгоритма, граф контроле тока ће бити измењен, па је потребно поново одредити релације доминације.

4.9 Елиминација мртвог кôда

Елиминација мртвог кôда (енгл. dead code elimination) представља глобални оптимизациони пролаз који брише инструкције које не производе дејство које утиче на семантику програма. Такав кôд се назива мртвим кôдом, а треба га разликовати од недостижног (енгл. unreachable) кôда који такође јесте мртав, али има друго порекло. Алгоритам елиминације мртвог кôда се састоји из два пролаза: *mark* и *sweep* пролаза. Први пролаз има за циљ да означи инструкције које су живе, а које треба задржати, док *sweep* пролаз је ту да изврши уклањање свих неозначених инструкција у првом пролазу.

Mark пролаз почиње тако што пролази кроз све базичне блокове посматране функције и означава инструкције које су критичне. Инструкција је критична ако њено брисање мења семантику програма или представља инструкцију која мора да постоји у свакој функцији (GEN_LABEL, ENTER, LEAVE). У нашем међујезику скуп критичних инструкција укључује: SCANF, PRINTF, RETURN, PARAM, CALL, INVOKE_VIRTUAL, MALLOC, ALOAD, ASTORE, STORE PTR инструкције. Све критичне инструкције се додају у ред за обраду. Потом се једна по једна инструкција узима из реда за обраду и проверавају аргументи инструкције, те ако инструкција референцира неку променљиву коју генерише нека друга инструкција (овде

је неопходна SSA форма или се морају означити све инструкције које уписују у референцирану променљиву) тада се та генеришућа инструкција означава да треба да се задржи, и додаје се у ред за обраду. У пракси све креће од RETURN и PRINTF инструкција уназад. Ова процедура се онда понавља све док постоје неозначени, а референцирани дестинациони објектни чворови. Ако се аргумент инструкције која се тренутно посматра генерише у неком друго базичном блоку тада је потребно све блокове који припадају *reverse dominance frontier* скупу текућег блока означити, тј. треба означити CMP инструкцију и инструкцију условног гранања којом се ти блокови нужно завршавају.

Sweep пролаз је нешто једноставнији, и његова сврха, као што је поменуто, је да обрише све неозначене инструкције и притом обрише непотребна гранања која могу да настану. Ако неозначена инструкција није инструкција скока тада се она може једноставно обрисати, а ако се ради о инструкцији безусловног скока тада не треба ништа радити. Коначно, ако се ради о инструкцији условног скока тада њу треба обрисати заједно са претходећом CMP инструкцијом, и заменити је инструкцијом безусловног скока која треба да скаче на најближи живи постдоминатор (доминатор над обрнутим графом контроле тока). Притом је потребно превезати показиваче. За одређивање најближег живог постдоминатора користи се *Dijkstra* алгоритам имплементиран преко приоритетног реда.

После извршавања наведеног алгоритма, граф контроле тока ће бити измењен, па је потребно поново одредити релације доминације.

4.10 Враћање у нормалну форму

Генерисање нормалне форме од SSA форме је врло једноставно. Потребно је обрадити сваку Ф-функцију тако да се Ф-функција облика $t = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ замени са $t = phi$ у истом базичном блоку у коме је дефинисана, а да се у сваком базичном блоку који дефинише неко x_i на крај тог базичног блока дода инструкција $phi = x_i$, где је $i = \overline{1, n}$.

5. Генерисање асемблерског кôда

Ограничења наметнута генератору кôда циљне машине су врло стриктна. Циљни програм мора да задржи семантику изворног програма и да буде строго ефикасан и у виду перформанси, и у погледу заузећа ресурса машине. Проблем алокације ресурса представља НП-комплетан проблем, тј. експоненцијалне је сложености. Стога данашњи компајлери примењују разне хеуристике које генеришу добар, али не и гарантовано оптималан програмски кôд. Овакве технике се примењују пар деценија уназад и врло добро су усавршене по [ALSU06]. Међутим, како ово може да буде врло широка област и готово да нема краја у могућим усавршавањима преводилаца, биће представљена најједноставнија варијанта генератора кôда на нивоу базичних блокова.

Како је циљни инструкцијски сет x86-64, постоје две конвенције позивања које су примењене у пракси, и то Microsoft x64 Calling Convention и System V AMD64 ABI. Пошто је циљани оперативни систем овог рада Unix, биће примењена System V AMD64 ABI конвенција позивања. Такође, асемблерски кôд се генерише по Intel синтакси, која је релативно читљивију у односу на AT&T синтаксу. Коришћени преводилац за генерисани асемблерски кôд је GNU асемблер.

5.1 Преамбула

Пре преласка на сам генератор кôда функција потребно је генерисати одређене асемблерске директиве које ће да дефинишу функције calloc, scanf и printf као симболе са спољним повезивањем (енгл. extern), јер ће они бити дефинисани у стандардној C библиотеци преводиоца GCC. Ово је неопходно линкеру, јер ће се инструкције међујезика MALLOC, SCANF и PRINTF пресликавати у горе наведене функције, респективно.

Поред дефинисања екстерних функција, потребно је обезбедити простор за глобалне променљиве дефинисане у МикроЈава програму, а које су, по правилу, неиницијализоване, те се стога традиционално смештају у *.bss* секцију.

Такође, ради омогућавања рада са стандардним улазом и излазом потребно је дефинисати ниску (енгл. string) за форматирање горе претходно наведених улазно/излазних функција. То је у нашем случају, само рад са целим бројевима и појединачним карактерима. Уколико су у МикроЈава програму дефинисане класе, овде је место где се стављају табеле виртуелних функција које омогућавају полиморфно понашање. Касније ће бити дато више детаља о њима. Наведено се све пакује у *.rodata* секцију, којој само име говори да је непроменљива (енгл. read-only).

По стандарду МикроЈаве дефинисан је скроман скуп уграђених функција (ord, chr, len), и оне су смештене у секцију *.text.builtin*.

5.2 Рад са регистрима и променљивама

Један од кључних проблема приликом процеса генерисања кôда је како најефикасније искористити регистре. То је битно јер регистри имају далеко мање кашњење при приступу у односу на меморију, те се могу користити за чување привремених међурезултата, података који се често користе, за бројач итерација петље и др. Проблем настаје јер потражња за регистрима далеко надмашује њихов број, што имплицира честу замену (енгл. swapping).

Раније је наведено да ће асемблерски кôд бити генерисан на нивоу базичног блока. Потребно је генерисати одговарајуће асемблерске наредбе на нивоу сваке инструкције

базичног блока, и то дохватање операнада, извршавање инструкције са наведеним операндима и упис резултата на одговарајуће место. Треба имати у виду да x86-64 архитектура дозвољава да у оквиру једне асемблерске наредбе само један операнд буде у меморији.

У циљу вођења кохерентне слике меморије уводе се структуре података под називом дескриптори. Разликујемо две врсте, и то:

(1) дескриптор регистра – односи се на регистар, те чува информацију о томе која променљива се тренутно налази у њему;
(2) дескриптор адресе – односи се на конкретну меморијску локацију, те чува информацију која се променљива налази на тој адреси.

Такође, потребно је водити и рачуна о списку променљивих које су у dirty стању у регистрима. На крају сваког базичног блока потребно је све променљиве које су dirty уписати у меморију, а ради једноставности усвојено је да једна променљива може да буде у највише једном регистру.

Напоменуто је да је избор регистра за чување променљиве једна од критичних операција. Ову функцију ћемо називати у даљем тексту `getRegister()`, а следи поједностављени алгоритам наведен у [ALSU06].

Алгоритам 3:

Нека је инструкција облика $x = y + z$. Правила за избор регистра за смештање променљиве y су следећа:

(1) ако y се већ налази у неком регистру, вратити тај регистар;
(2) ако y се не налази ни у једном регистру и постоји слободан регистар, тада вратити такав слободан регистар;
(3) ако оба горња случаја нису испуњена онда Round-Robin алгоритмом вратити неки регистар (напомена: овде може да настане проблем ако се више пута позива ова функција заредом, па је потребно обезбедити да се не врати сваки пут исти регистар).

Притом, функција getRegister() се у овој имплементацији не бави било каквим уписом у регистар који враћа, већ је за то задужена функција `fetchOperand()` која има улогу да у дати регистар смести жељену вредност уз евентуално избацивање претходне вредности и њено чување у меморију. Такође, за ажурирање табеле дескриптора користи се функција validate(…).

5.3 Табеле за полиморфизам

Полиморфизам представља жељену и неопходну особину модерних објектно-оријентисаних програмских језика, а може представљати компликован проблем у случају вишеструког наслеђивања. Проблем је како у време извршавања одредити коју методу позвати.

Како МикроЈава омогућава само једноструко наслеђивање, а проблем се решава једноставно генерисањем табеле виртуелних функција, и то тако што се за сваку методу која је дефинисана, наслеђена или преклопљена на нивоу појединачне класе дефинише табела показивача на те функције у асемблеру. Табела се налази у .rodata секцији, а ово значи да се у време превођења мора одредити структура табеле, као и помераји појединачних функција унутар табеле. Начини генерисања кода биће описани у

имплементацији инструкције INVOKE_VIRTUAL. Процедура и додатни концепти генерисања и коришћења табела су описани у [App02] и [Boj11].

5.4 Мапирање инструкција међујезика

Аритметичке инструкције ADD, SUB и MUL међујезика испољавају заједничке особине и мапирају се у асемблер на исти начин и то, бирање регистра за смештање операнада, њихово дохватање, издавање одговарајуће асемблерске инструкције ADD, SUB и IMUL респективно, те ажурирање дескриптора дестинационог регистра. Инструкција NEG се може одрадити врло једноставно, комбинацијом до сада наведених знања. Овде је битно напоменути да су операције инкрементирања и декрементирања одрађене преко инструкција ADD и SUB, респективно, јер су INC и DEC инструкције асемблера проблематичне зато што не ажурирају апсолутно исти скуп флегова програмске статусне речи као и ADD и SUB, па ако се користе као услов скока може бити потребна додатна CMP инструкција. Због тога се препоручује њихово избегавање [Fog20].

Случај са инструкцијама DIV и REM је нешто другачији и оне су сложеније. Наиме, дељење бројева захтева да се тај 64-битни број смести у EDX:EAX регистре, а резултати дељења, односно остатка при дељењу се смештају у EAX и EDX регистре, респективно. Како МикроЈава подржава само 32-битне целобројне величине, потребно је уметнути инструкцију CDQ која врши проширивање EDX знаком броја у EAX. Одговарајућа инструкција за дељење на x86-64 асемблеру је IDIV.

Инструкције типа LOAD јесу релативно једноставне и неће бити детаљно описиване, док инструкције типа STORE по спецификацији међујезика подржавају упис директно и преко показивача. У случају уписа преко показивача имаћемо регистарско индиректно адресирање, док је ситуација са директним уписивањем тривијална.

Алокација меморије на heap-у инструкцијом MALLOC захтева посебну пажњу. И то што захтева позивање функције calloc стандардне C библиотеке. Овом инструкцијом може да се алоцира простор за низ или за инстанцу класе. Случај низа је једноставан јер је у инструкцији међујезика наведена величина низа и то се једноставно прослеђује calloc функцији. У случају алокације меморије за објекат класе, тада је потребно обезбедити простор величине збира свих поља унутар класе увећан за осам, што представља додатно поље 64-битног показивача на виртуелну табелу функција те класе. На основу типа класе потребно је на адресу враћену функцијом calloc уписати адресу одговарајуће табеле виртуелних функција.

Приступ елементима низа инструкцијом ALOAD се одвија на једноставан начин уз коришћење барем два архитектурална регистара. Један је потребан за адресу регистра, и други за индексну променљиву. Пошто МикроЈава подржава низове различитих елементарних типова, могућа је самим тим и променљива величина тих елементарних типова, те се индексна променљива множи са величином појединачног елемента (нпр. [rbx + ELEMENT_SIZE * rbx]). Пошто је индекс у МикроЈави 32-битна величина, потребно га је проширити на 64-битну величину, те се индексна променљива учитава у регистар инструкцијом MOVSXD. Процедура је аналогна за ASTORE инструкцију међујезика.

Инструкција међујезика GET_PTR се у нашем случају своди на једноставно сабирање првог аргумента инструкције са померајем жељеног поља.

Најсложенији је поступак позивања других процедура (функција) у оквиру програма. Прослеђивање параметара се врши инструкцијом међујезика PARAM која се своди на смештање првих шест аргумената функције у одговарајуће регистре у складу са

System V AMD64 ABI, и то у RDI, RSI, RDX, RCX, R8, R9 редом, а онда и стављањем осталих параметара на стек у обрнутом редоследу. Након тога може да се изда инструкција CALL. Процедура за позив функције унутар класе јесте индиректни скок и то тако што се на основу адресе имплицитног показивача *this* одреди адреса виртуелне табеле функција из које се дохвати адреса жељене функције а онда на њу скочи инструкцијом CALL. По повратку из позване функције, сви стековски параметри се скидају, а ако позвана функција враћа повратну вредност, она се налази у RAX.

Поступак уласка и изласка из метода помоћу инструкција ENTER и LEAVE је релативно једноставан. При уласку се вршу стављање RBP на стек, његово ажурирање да показује на показивач стека а онда и резервисање простора за локалне променљиве на стеку. Потребно је да величина поменутог простора буде дељива са 16, по конвенцији. На изласку из методе потребно је сачувати *dirty* глобалне променљиве у меморији и издати инструкције LEAVE и RET. Такође ако се мења неки од регистара чија вредност мора да буде сачувана приликом позива процедура, онда је њих потребно сачувати некако (нпр. на стеку). Повратна вредност методе се прослеђује RET инструкцијом међујезика, и онда је тривијална, као и инструкција међујезика GEN_LABEL.

Рад са улазом/излазом се своди на позивање функција *scanf* и *printf* стандардне C библиотеке, респективно, и поступак позивања функција је описан раније. Једина ствар о којој треба водити рачуна јесте да се у EAX регистар смешта нула, што омогућава позивање функција са варијабилним бројем аргумената, а какве су и две горепоменуте. Ово је у нашем случају нула, што се поставља једноставним ексклузивним ИЛИ. Такође, како би се вратио само један карактер приликом позива стандардне *scanf* функције потребно је да формат улаза има додатни бланко карактер.

Инструкције скока међујезика се деле на безусловне и условне. Обе карактерише то што је обавезно чување локалних и глобалних променљивих пре скока. У случају условног скока додаје се CMP асемблерска инструкција која генерише одговарајући услов скока.

6. Позивање преводиоца

До сада је концептуално објашњен процес превођења МикроЈава изворног кôда у асемблер циљне архитектуре. Процес покретања преводиоца за жељени кориснички програм је дат у наставку.

Преводилац се покреће позивом скрипте “mjavac.sh”. Она представља омотач позива извршном окружењу JVM да преведе достављени изворни кôд, затим преведе GNU асемблером излазни фајл МикроЈава преводиоца, а онда и покрене извршење програма. Преводилац подржава следеће аргументе:

(1) -help ⇔ врши испис могућих команди преводиоца
(2) -input [PATH] ⇔ путања до изворног кôда
(3) -output [PATH] ⇔ путања на којој ће бити уписан преведени кôд
(4) -dump_ast ⇔ приказ апстрактног синтаксног стабла изворног кôда
(5) -dump_symbols ⇔ приказ табеле симбола програма
(6) -dump_ir ⇔ приказ инструкција међујезика
(7) -dump_asm ⇔ приказ генерисаног асемблерског кôда
(8) -optimize_ir ⇔ укључивање оптимизатора кôда

Додавањем параметра “-invoke_after” приликом позива горенаведене скрипте извршиће се покретање преведеног програма. Преведени програм има исто име као улазни МикроЈава фајл.

7. Закључак

У раду је представљен један једноставни програмски преводилац за језик МикроЈава, а који притом демонстрира готово све базичне функционалности које модерни програмски језици данас поседују, и то низове, класе, наслеђивање, полиморфизам. Језик пружа довољно конструката да се могу писањем преводиоца за њега стећи и добро научити основе програмских преводилаца, а што представља неопходно знања за даље изучавање и конструкцију напредних преводилаца.

Програмски преводиоци су широка, готово непресушна област за нове идеје, те тако овај рад има безброј места на којима је могуће додати неку нову функционалност и унапредити ефикасност преводиоца. Простор за даљи рад укључује унапређење униформности међујезика, јер су неке инструкције у њему редундантне (конкретно, ALOAD и ASTORE), додавање нових оптимизационих пролаза, имплементирање алгоритма за ефикасну алокацију виртуелних регистара у физичке, имплементирање напреднијег генератора међукôда, сакупљача ђубрета, итд.

8. Додатак

7.1 Пример процедуралног програма

Дат је МикроЈава изворни код тест програма, представа у међујезику, као и излазни асемблерски кôд.

```
program test301

   const int nula = 0;
   const int jedan = 1;
   const int pet = 5;

   int niz[];
   char nizch[];

{
   void incInput()
   int i;
   {
      read(i);
      print(i);
      i++;
      print(i);
   }

   void main()
      int bodovi;
   {
      bodovi = 0;
      bodovi++;
      bodovi = bodovi + jedan;
      bodovi = bodovi * pet;
      bodovi--;
      print(bodovi);
      niz = new int[3];
      niz[nula] = jedan;
      niz[1] = 2;
      niz[niz[jedan]] =
niz[niz[0]] * 3;
      bodovi = niz[2]/niz[0];
      print(bodovi);
      print(niz[2]);


      nizch = new char[3];
      nizch[0] = 'a';
      nizch[jedan] = 'b';
      nizch[pet - 3] = 'c';
      print(nizch[1]);
      print(nizch[jedan * 2]);


      bodovi = bodovi + (pet *
jedan - 1) * bodovi - (3 % 2 + 3 *
2 - 3);
      print(bodovi);

      incInput();
   }
}
```

```
-------------------------------------------------------------------
GEN_LABEL       | incInput              |                       |                       |
ENTER           | 16                    |                       |                       |
SCANF           |                       | %d                    | i             (A)     |
PRINTF          | %d                    | i             (A)     |                       |
ADD             | i             (A)     | 1             (A)     | i             (A)     |
PRINTF          | %d                    | i             (A)     |                       |
LEAVE           |                       |                       |                       |
-------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------------
GEN_LABEL       | main                  |                       |                       |
ENTER           | 112                   |                       |                       |
STORE           | 0             (A)     |                       | bodovi        (A)     |
ADD             | bodovi        (A)     | 1             (A)     | bodovi        (A)     |
ADD             | bodovi        (D)     | 1             (A)     | t1            (A)     |
STORE           | t1            (D)     |                       | bodovi        (A)     |
MUL             | bodovi        (D)     | 5             (A)     | t2            (A)     |
STORE           | t2            (D)     |                       | bodovi        (A)     |
SUB             | bodovi        (A)     | 1             (A)     | bodovi        (A)     |
PRINTF          | %d                    | bodovi        (D)     |                       |
MALLOC          | 3                     | ARR                   | niz           (D)     |
ASTORE          | 1             (A)     | 0             (A)     | niz           (D)     |
ASTORE          | 2             (A)     | 1             (A)     | niz           (A)     |
ALOAD           | niz           (A)     | 1             (A)     | t3            (A)     |
```

ALOAD	niz	(A)	0	(A)	t4	(A)		
ALOAD	niz	(D)	t4	(D)	t5	(A)		
MUL	t5	(D)	3	(A)	t6	(A)		
ASTORE	t6	(D)	t3	(D)	niz	(A)		
ALOAD	niz	(A)	2	(A)	t7	(A)		
ALOAD	niz	(A)	0	(A)	t8	(A)		
DIV	t7	(D)	t8	(D)	t9	(A)		
STORE	t9	(D)			bodovi	(A)		
PRINTF	%d		bodovi	(A)				
ALOAD	niz	(A)	2	(A)	t10	(A)		
PRINTF	%d		t10	(D)				
MALLOC	3		ARR		nizch	(D)		
ASTORE	97	(A)	0	(A)	nizch	(D)		
ASTORE	98	(A)	1	(A)	nizch	(D)		
SUB	5	(A)	3	(A)	t11	(A)		
ASTORE	99	(A)	t11	(D)	nizch	(A)		
ALOAD	nizch	(A)	1	(A)	t12	(A)		
PRINTF	%c		t12	(D)				
MUL	1	(A)	2	(A)	t13	(A)		
ALOAD	nizch	(A)	t13	(D)	t14	(A)		
PRINTF	%c		t14	(D)				
MUL	5	(A)	1	(A)	t15	(A)		
SUB	t15	(D)	1	(A)	t16	(A)		
MUL	t16	(D)	bodovi	(A)	t17	(A)		
ADD	bodovi	(D)	t17	(D)	t18	(A)		
REM	3	(A)	2	(A)	t19	(A)		
MUL	3	(A)	2	(A)	t20	(A)		
ADD	t19	(D)	t20	(D)	t21	(A)		
SUB	t21	(D)	3	(A)	t22	(A)		
SUB	t18	(D)	t22	(D)	t23	(A)		
STORE	t23	(D)			bodovi	(A)		
PRINTF	%d		bodovi	(A)				
CALL	incInput	(A)						
LEAVE								

```
.intel_syntax noprefix
.extern calloc
.extern printf
.extern scanf
.global main

.section .bss
niz:
        .quad 0x0
nizch:
        .quad 0x0


.section .rodata
write_character_format:
        .asciz "%c"
write_number_format:
        .asciz "%d"
read_character_format:
        .asciz " %c"
read_number_format:
        .asciz " %d"

.section .text.builtin
ord_0:
        PUSH rbp
        MOV rbp, rsp
        MOVSX rax, dil
        LEAVE
        RET
```

```
chr_0:
        PUSH rbp
        MOV rbp, rsp
        MOV al, dil
        LEAVE
        RET

.section .text
incInput_1:
        PUSH rbp
        MOV rbp, rsp
        SUB rsp, 16
        pushq rbx
        pushq r12
        pushq r13
        pushq r14
        pushq r15
        sub rsp, 24



        LEA rdi, [rip +
read_number_format]
        LEA rsi, DWORD PTR [RBP - 4]
        XOR eax, eax
        CALL scanf
        MOV eax, DWORD PTR [RBP - 4]
        MOV esi, eax
        LEA rdi, [rip +
write_number_format]
        XOR eax, eax
```

```
        CALL printf
        MOV ebx, DWORD PTR [RBP - 4]
        MOV ecx, 1
        ADD ebx, ecx
        MOV DWORD PTR [RBP - 4], ebx
        MOV esi, ebx
        LEA rdi, [rip +
write_number_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf



        add rsp, 24
        popq r15
        popq r14
        popq r13
        popq r12
        popq rbx
        LEAVE
        RET
main:
        PUSH rbp
        MOV rbp, rsp
        SUB rsp, 112
        pushq rbx
        pushq r12
        pushq r13
        pushq r14
        pushq r15
        sub rsp, 24




        MOV eax, 0
        MOV ebx, 1
        ADD eax, ebx
        MOV ecx, 1
        MOV DWORD PTR [RBP - 4], eax
        ADD eax, ecx
        MOV DWORD PTR [RBP - 92], eax
        MOV edx, 5
        MOV DWORD PTR [RBP - 4], eax
        IMUL eax, edx
        MOV DWORD PTR [RBP - 44], eax
        MOV edi, 1
        SUB eax, edi
        MOV DWORD PTR [RBP - 4], eax
        MOV esi, eax
        LEA rdi, [rip +
write_number_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV rdi, 3
        MOV rsi, 4
        XOR eax, eax
        CALL calloc
        MOV niz, rax

        MOV rsi, niz
        MOV r8, 0
        MOV r9d, 1
        MOV DWORD PTR [rsi + 4 * r8], r9d
        MOV r10, 1
        MOV r11d, 2
        MOV DWORD PTR [rsi + 4 * r10],
r11d
        MOV r12, 1
        MOV r13d, DWORD PTR [rsi + 4 *
r12]
        MOV r14, 0
        MOV r15d, DWORD PTR [rsi + 4 *
r14]
        MOV eax, DWORD PTR [rsi + 4 * r15]
        MOV ebx, 3
        MOV DWORD PTR [RBP - 61], eax
        IMUL eax, ebx
        MOV DWORD PTR [rsi + 4 * r13], eax
        MOV rcx, 2
        MOV edx, DWORD PTR [rsi + 4 * rcx]
        MOV rdi, 0
        MOV DWORD PTR [RBP - 20], eax
        MOV eax, DWORD PTR [rsi + 4 * rdi]
        MOV DWORD PTR [RBP - 48], edx
        MOV DWORD PTR [RBP - 8], eax
        MOV eax, DWORD PTR [RBP - 48]
        CDQ
        MOV ebx, DWORD PTR [RBP - 8]
        IDIV ebx
        MOV ecx, eax
        MOV DWORD PTR [RBP - 68], ecx
        MOV DWORD PTR [RBP - 28], r15d
        MOV DWORD PTR [RBP - 32], r13d
        MOV DWORD PTR [RBP - 4], ecx
        MOV esi, ecx
        LEA rdi, [rip +
write_number_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV rax, niz
        MOV rbx, 2
        MOV ecx, DWORD PTR [rax + 4 * rbx]
        MOV DWORD PTR [RBP - 88], ecx
        MOV esi, ecx
        LEA rdi, [rip +
write_number_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV rdi, 3
        MOV rsi, 1
        XOR eax, eax
        CALL calloc
        MOV nizch, rax

        MOV rdx, nizch
        MOV rdi, 0
        MOV sil, 97
        MOV BYTE PTR [rdx + 1 * rdi], sil
        MOV r8, 1
        MOV r9b, 98
        MOV BYTE PTR [rdx + 1 * r8], r9b
        MOV r10d, 5
        MOV r11d, 3
        SUB r10d, r11d
        MOV r12b, 99
        MOV BYTE PTR [rdx + 1 * r10], r12b
        MOV r13, 1
        MOV r14b, BYTE PTR [rdx + 1 * r13]
        MOV BYTE PTR [RBP - 77], r14b
        MOV DWORD PTR [RBP - 57], r10d
        MOV sil, r14b
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
```

```
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV r15d, 1
        MOV eax, 2
        IMUL r15d, eax
        MOV rbx, nizch
        MOV cl, BYTE PTR [rbx + 1 * r15]
        MOV BYTE PTR [RBP - 49], cl
        MOV DWORD PTR [RBP - 96], r15d
        MOV sil, cl
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV edx, 5
        MOV edi, 1
        IMUL edx, edi
        MOV esi, 1
        MOV DWORD PTR [RBP - 40], edx
        SUB edx, esi
        MOV r8d, DWORD PTR [RBP - 4]
        MOV DWORD PTR [RBP - 76], edx
        IMUL edx, r8d
        ADD r8d, edx
        MOV DWORD PTR [RBP - 84], edx
        MOV eax, 3
        CDQ
        MOV r9d, 2
        IDIV r9d
        MOV r10d, edx
        MOV r11d, 3
        MOV r12d, 2
        IMUL r11d, r12d
        MOV DWORD PTR [RBP - 12], r10d
        ADD r10d, r11d
        MOV r13d, 3
        MOV DWORD PTR [RBP - 24], r10d
        SUB r10d, r13d
        MOV DWORD PTR [RBP - 72], r8d
        SUB r8d, r10d
        MOV DWORD PTR [RBP - 36], r8d
        MOV DWORD PTR [RBP - 16], r11d
        MOV DWORD PTR [RBP - 4], r8d
        MOV DWORD PTR [RBP - 53], r10d
        MOV esi, r8d
        LEA rdi, [rip +
write_number_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        CALL incInput_1


        add rsp, 24
        popq r15
        popq r14
        popq r13
        popq r12
        popq rbx
        LEAVE
        RET
```

7.2 Пример објектно оријентисаног програма

Дат је МикроЈава изворни код тест програма, представа у међујезику, као и излазни асемблерски кôд.

```
program MJProgram
   const int size = 10;

   class Point
   {
      int x, y;
      {
         void setX(int x) { this.x
= x; }
         void setY(int y) { this.y
= y; }

         void toString()
         {
            print('(');
            print(x); print(',');
print(' '); print(y);
            print(')');
         }
      }
   }

   abstract class Shape
   {
      int r;
      Point point;
      {
         void place(int x, int y,
int r)
         {
            point = new Point;
            point.setX(x);
            point.setY(y);
            this.r = r;
         }

         abstract int O();
         abstract int P();
         abstract void toString();
      }
   }

   class Circle extends Shape
   {
      {
         int O() { return 2 * r *
3; }
         int P() { return r * r *
3; }

         void toString()
         {
            print('C');
print('i'); print('r');
print('c'); print('l');
print('e');
            print('(');
            print(r); print(',');
print(' '); point.toString();
            print(')');
         }
      }
   }

   class Square extends Shape
   {
      {
         int O() { return 4 * r; }
         int P() { return r * r; }

         void toString()
         {
            print('S');
print('q'); print('u');
print('a'); print('r');
print('e');
            print('(');
            print(r); print(',');
print(' '); point.toString();
            print(')');
         }
      }
   }

   Shape shapes[];
   int index, O, P;
{
   void main()
      int i;
      int x, y, z;
      char choice;
   {
      shapes = new Shape[size];

      read(choice);
      for (; choice != '.' &&
index < size;)
      {
         if (choice == 'c' ||
choice == 'C')
         {
            read(x); read(y);
read(z);
            shapes[index] = new
Circle;
            shapes[index].place(x,
y, z);
         }
         else if (choice == 's' ||
choice == 'S')
```

```
         {
            read(x); read(y);
read(z);
            shapes[index] = new
Square;
            shapes[index].place(x,
y, z);
         }
         else break;

         O = O +
shapes[index].O();
         P = P +
shapes[index].P();

         index++;
         read(choice);
      }
```

```
      for (i = 0; i < index; i++)
      {
         shapes[i].toString();
         print(chr(10));
      }

      if (index > 0)
      {
         O = O / index;
         P = P / index;
      }

      print('O'); print(' ');
print('='); print(' '); print(O);
print(chr(10));
      print('P'); print(' ');
print('='); print(' '); print(P);
   }
}
```

GEN_LABEL	setX						
ENTER	32						
GET_PTR	this	(A)	x	(A)	t1	(D)	
STORE	x	(A)	PTR		t1	(D)	
LEAVE							

GEN_LABEL	setY						
ENTER	32						
GET_PTR	this	(A)	y	(A)	t2	(D)	
STORE	y	(A)	PTR		t2	(D)	
LEAVE							

GEN_LABEL	toString						
ENTER	48						
PRINTF	%c		40	(A)			
GET_PTR	this	(A)	x	(A)	t3	(A)	
LOAD	t3	(D)			t4	(A)	
PRINTF	%d		t4	(D)			
PRINTF	%c		44	(A)			
PRINTF	%c		32	(A)			
GET_PTR	this	(A)	y	(A)	t5	(A)	
LOAD	t5	(D)			t6	(A)	
PRINTF	%d		t6	(D)			
PRINTF	%c		41	(A)			
LEAVE							

GEN_LABEL	place						
ENTER	80						
GET_PTR	this	(A)	point	(A)	t7	(D)	
MALLOC	Point	(A)	PTR		t7	(D)	
GET_PTR	this	(A)	point	(A)	t8	(A)	
LOAD	t8	(D)			t9	(A)	
PARAM	t9	(D)					
PARAM	x	(A)					
INVOKE_VIRTUAL	setX	(A)					
GET_PTR	this	(A)	point	(A)	t10	(A)	
LOAD	t10	(D)			t11	(A)	
PARAM	t11	(D)					
PARAM	y	(A)					
INVOKE_VIRTUAL	setY	(A)					
GET_PTR	this	(A)	r	(A)	t12	(D)	

```
STORE           | r               (A)   | PTR                 | t12             (D)   |
LEAVE           |                       |                     |                       |
-------------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------------------------
GEN_LABEL       | O                     |                     |                       |
ENTER           | 32                    |                     |                       |
GET_PTR         | this            (A)   | r               (A) | t13             (A)   |
LOAD            | t13             (D)   |                     | t14             (A)   |
MUL             | 2               (A)   | t14             (D) | t15             (A)   |
MUL             | t15             (D)   | 3               (A) | t16             (A)   |
RETURN          | t16             (D)   |                     |                       |
JMP             |                       |                     | CGL_0                 |
GEN_LABEL       | CGL_0                 |                     |                       |
LEAVE           |                       |                     |                       |
-------------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------------------------
GEN_LABEL       | P                     |                     |                       |
ENTER           | 48                    |                     |                       |
GET_PTR         | this            (A)   | r               (A) | t17             (A)   |
LOAD            | t17             (D)   |                     | t18             (A)   |
GET_PTR         | this            (A)   | r               (A) | t19             (A)   |
LOAD            | t19             (D)   |                     | t20             (A)   |
MUL             | t18             (D)   | t20             (D) | t21             (A)   |
MUL             | t21             (D)   | 3               (A) | t22             (A)   |
RETURN          | t22             (D)   |                     |                       |
JMP             |                       |                     | CGL_1                 |
GEN_LABEL       | CGL_1                 |                     |                       |
LEAVE           |                       |                     |                       |
-------------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------------------------
GEN_LABEL       | toString              |                     |                       |
ENTER           | 48                    |                     |                       |
PRINTF          | %c                    | 67              (A) |                       |
PRINTF          | %c                    | 105             (A) |                       |
PRINTF          | %c                    | 114             (A) |                       |
PRINTF          | %c                    | 99              (A) |                       |
PRINTF          | %c                    | 108             (A) |                       |
PRINTF          | %c                    | 101             (A) |                       |
PRINTF          | %c                    | 40              (A) |                       |
GET_PTR         | this            (A)   | r               (A) | t23             (A)   |
LOAD            | t23             (D)   |                     | t24             (A)   |
PRINTF          | %d                    | t24             (D) |                       |
PRINTF          | %c                    | 44              (A) |                       |
PRINTF          | %c                    | 32              (A) |                       |
GET_PTR         | this            (A)   | point           (A) | t25             (A)   |
LOAD            | t25             (D)   |                     | t26             (A)   |
PARAM           | t26             (D)   |                     |                       |
INVOKE_VIRTUAL  | toString        (A)   |                     |                       |
PRINTF          | %c                    | 41              (A) |                       |
LEAVE           |                       |                     |                       |
-------------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------------------------
GEN_LABEL       | O                     |                     |                       |
ENTER           | 32                    |                     |                       |
GET_PTR         | this            (A)   | r               (A) | t27             (A)   |
LOAD            | t27             (D)   |                     | t28             (A)   |
MUL             | 4               (A)   | t28             (D) | t29             (A)   |
RETURN          | t29             (D)   |                     |                       |
JMP             |                       |                     | CGL_2                 |
GEN_LABEL       | CGL_2                 |                     |                       |
LEAVE           |                       |                     |                       |
-------------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------------------------
GEN_LABEL       | P                     |                     |                       |
ENTER           | 48                    |                     |                       |
GET_PTR         | this            (A)   | r               (A) | t30             (A)   |
```

```
LOAD            | t30             (D)   |                       | t31             (A)   |
GET_PTR         | this            (A)   | r               (A)   | t32             (A)   |
LOAD            | t32             (D)   |                       | t33             (A)   |
MUL             | t31             (D)   | t33             (D)   | t34             (A)   |
RETURN          | t34             (D)   |                       |                       |
JMP             |                       |                       | CGL_3                 |
GEN_LABEL       | CGL_3                 |                       |                       |
LEAVE           |                       |                       |                       |
-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------------------
GEN_LABEL       | toString              |                       |                       |
ENTER           | 48                    |                       |                       |
PRINTF          | %c                    | 83              (A)   |                       |
PRINTF          | %c                    | 113             (A)   |                       |
PRINTF          | %c                    | 117             (A)   |                       |
PRINTF          | %c                    | 97              (A)   |                       |
PRINTF          | %c                    | 114             (A)   |                       |
PRINTF          | %c                    | 101             (A)   |                       |
PRINTF          | %c                    | 40              (A)   |                       |
GET_PTR         | this            (A)   | r               (A)   | t35             (A)   |
LOAD            | t35             (D)   |                       | t36             (A)   |
PRINTF          | %d                    | t36             (D)   |                       |
PRINTF          | %c                    | 44              (A)   |                       |
PRINTF          | %c                    | 32              (A)   |                       |
GET_PTR         | this            (A)   | point           (A)   | t37             (A)   |
LOAD            | t37             (D)   |                       | t38             (A)   |
PARAM           | t38             (D)   |                       |                       |
INVOKE_VIRTUAL  | toString        (A)   |                       |                       |
PRINTF          | %c                    | 41              (A)   |                       |
LEAVE           |                       |                       |                       |
-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------------------
GEN_LABEL       | main                  |                       |                       |
ENTER           | 112                   |                       |                       |
MALLOC          | 10                    | ARR                   | shapes          (A)   |
SCANF           |                       | %c                    | choice          (A)   |
GEN_LABEL       | CGL_4                 |                       |                       |
JE              | choice          (A)   | 46              (A)   | CGL_5                 |
JGE             | index           (N/A) | 10              (N/A) | CGL_5                 |
JNE             | choice          (N/A) | 99              (N/A) | L0                    |
JMP             |                       |                       | L1                    |
GEN_LABEL       | L0                    |                       |                       |
JNE             | choice          (A)   | 67              (A)   | L2                    |
GEN_LABEL       | L1                    |                       |                       |
SCANF           |                       | %d                    | x               (A)   |
SCANF           |                       | %d                    | y               (A)   |
SCANF           |                       | %d                    | z               (A)   |
MALLOC          | Circle          (A)   |                       | t39             (A)   |
ASTORE          | t39             (D)   | index           (A)   | shapes          (A)   |
ALOAD           | shapes          (A)   | index           (A)   | t40             (A)   |
PARAM           | t40             (D)   |                       |                       |
PARAM           | x               (A)   |                       |                       |
PARAM           | y               (A)   |                       |                       |
PARAM           | z               (A)   |                       |                       |
INVOKE_VIRTUAL  | place           (A)   |                       |                       |
JMP             |                       |                       | L7                    |
GEN_LABEL       | L2                    |                       |                       |
JNE             | choice          (A)   | 115             (A)   | L3                    |
JMP             |                       |                       | L4                    |
GEN_LABEL       | L3                    |                       |                       |
JNE             | choice          (A)   | 83              (A)   | L5                    |
GEN_LABEL       | L4                    |                       |                       |
SCANF           |                       | %d                    | x               (A)   |
SCANF           |                       | %d                    | y               (A)   |
SCANF           |                       | %d                    | z               (A)   |
MALLOC          | Square          (A)   |                       | t41             (A)   |
```

ASTORE	t41	(D)	index	(A)	shapes	(A)	
ALOAD	shapes	(A)	index	(A)	t42	(A)	
PARAM	t42	(D)					
PARAM	x	(A)					
PARAM	y	(A)					
PARAM	z	(A)					
INVOKE_VIRTUAL	place	(A)					
JMP					L6		
GEN_LABEL	L5						
JMP					CGL_5		
GEN_LABEL	L6						
GEN_LABEL	L7						
ALOAD	shapes	(A)	index	(A)	t43	(A)	
PARAM	t43	(D)					
INVOKE_VIRTUAL	O	(A)			t44	(A)	
ADD	O	(D)	t44	(D)	t45	(A)	
STORE	t45	(D)			O	(A)	
ALOAD	shapes	(A)	index	(A)	t46	(A)	
PARAM	t46	(D)					
INVOKE_VIRTUAL	P	(A)			t47	(A)	
ADD	P	(D)	t47	(D)	t48	(A)	
STORE	t48	(D)			P	(A)	
ADD	index	(A)	1	(A)	index	(A)	
SCANF			%c		choice	(A)	
JMP					CGL_4		
GEN_LABEL	CGL_5						
STORE	0	(A)			i	(A)	
GEN_LABEL	CGL_6						
JGE	i	(A)	index	(A)	CGL_7		
ALOAD	shapes	(N/A)	i	(N/A)	t49	(N/A)	
PARAM	t49	(D)					
INVOKE_VIRTUAL	toString	(A)					
PARAM	10	(A)					
CALL	chr	(A)			t50	(A)	
PRINTF	%c		t50	(D)			
GEN_LABEL	L8						
ADD	i	(A)	1	(A)	i	(A)	
JMP					CGL_6		
GEN_LABEL	CGL_7						
JLE	index	(A)	0	(A)	L9		
DIV	O	(N/A)	index	(N/A)	t51	(N/A)	
STORE	t51	(D)			O	(A)	
DIV	P	(D)	index	(A)	t52	(A)	
STORE	t52	(D)			P	(A)	
GEN_LABEL	L9						
PRINTF	%c		79	(A)			
PRINTF	%c		32	(A)			
PRINTF	%c		61	(A)			
PRINTF	%c		32	(A)			
PRINTF	%d		O	(A)			
PARAM	10	(A)					
CALL	chr	(A)			t53	(A)	
PRINTF	%c		t53	(D)			
PRINTF	%c		80	(A)			
PRINTF	%c		32	(A)			
PRINTF	%c		61	(A)			
PRINTF	%c		32	(A)			
PRINTF	%d		P	(A)			
LEAVE							

```
.intel_syntax noprefix
.extern calloc
.extern printf
.extern scanf
.global main
```

```
.section .bss
shapes:
	.quad 0x0
P:
	.long 0x0
index:
```

```
	.long 0x0
O:
	.long 0x0


.section .rodata
write_character_format:
	.asciz "%c"
write_number_format:
	.asciz "%d"
read_character_format:
	.asciz " %c"
read_number_format:
	.asciz " %d"

_vft_Point:
	.quad setX_1
	.quad setY_1
	.quad toString_1

_vft_Circle:
	.quad place_1
	.quad O_1
	.quad P_1
	.quad toString_2

_vft_Square:
	.quad place_1
	.quad O_2
	.quad P_2
	.quad toString_3

.section .text.builtin
ord_0:
	PUSH rbp
	MOV rbp, rsp
	MOVSX rax, dil
	LEAVE
	RET

chr_0:
	PUSH rbp
	MOV rbp, rsp
	MOV al, dil
	LEAVE
	RET

.section .text
setX_1:
	PUSH rbp
	MOV rbp, rsp
	SUB rsp, 32
	pushq rbx
	pushq r12
	pushq r13
	pushq r14
	pushq r15
	sub rsp, 24


	MOV QWORD PTR [RBP - 8], rdi
	MOV DWORD PTR [RBP - 20], esi

	MOV rax, QWORD PTR [RBP - 8]
	ADD rax, 8
	MOV ebx, DWORD PTR [RBP - 20]
	MOV QWORD PTR [rax], rbx


	add rsp, 24
	popq r15
	popq r14
	popq r13
	popq r12
	popq rbx
	LEAVE
	RET
setY_1:
	PUSH rbp
	MOV rbp, rsp
	SUB rsp, 32
	pushq rbx
	pushq r12
	pushq r13
	pushq r14
	pushq r15
	sub rsp, 24


	MOV QWORD PTR [RBP - 8], rdi
	MOV DWORD PTR [RBP - 20], esi

	MOV rax, QWORD PTR [RBP - 8]
	ADD rax, 12
	MOV ebx, DWORD PTR [RBP - 20]
	MOV QWORD PTR [rax], rbx


	add rsp, 24
	popq r15
	popq r14
	popq r13
	popq r12
	popq rbx
	LEAVE
	RET
toString_1:
	PUSH rbp
	MOV rbp, rsp
	SUB rsp, 48
	pushq rbx
	pushq r12
	pushq r13
	pushq r14
	pushq r15
	sub rsp, 24


	MOV QWORD PTR [RBP - 12], rdi

	MOV al, 40
	MOV sil, al
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV rbx, QWORD PTR [RBP - 12]
	ADD rbx, 8
	MOV rbx, QWORD PTR [rbx]
	MOV DWORD PTR [RBP - 16], ebx
	MOV esi, ebx
	LEA rdi, [rip +
write_number_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV cl, 44
```

```
        MOV sil, cl
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV dl, 32
        MOV sil, dl
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV rdi, QWORD PTR [RBP - 12]
        ADD rdi, 12
        MOV rdi, QWORD PTR [rdi]
        MOV DWORD PTR [RBP - 4], edi
        MOV esi, edi
        LEA rdi, [rip +
write_number_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV sil, 41
        MOV sil, sil
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf



        add rsp, 24
        popq r15
        popq r14
        popq r13
        popq r12
        popq rbx
        LEAVE
        RET
place_1:
        PUSH rbp
        MOV rbp, rsp
        SUB rsp, 80
        pushq rbx
        pushq r12
        pushq r13
        pushq r14
        pushq r15
        sub rsp, 24



        MOV QWORD PTR [RBP - 12], rdi
        MOV DWORD PTR [RBP - 4], esi
        MOV DWORD PTR [RBP - 60], edx
        MOV DWORD PTR [RBP - 76], ecx

        MOV rax, QWORD PTR [RBP - 12]
        ADD rax, 16
        MOV QWORD PTR [RBP - 24], rax
        MOV rdi, 16
        MOV rsi, 1
        XOR eax, eax
        CALL calloc
        MOV QWORD PTR [rax], OFFSET
_vft_Point
        MOV rbx, QWORD PTR [RBP - 24]
        MOV [rbx], rax

        MOV rcx, QWORD PTR [RBP - 12]
        ADD rcx, 16
        MOV rcx, QWORD PTR [rcx]
        MOV rdi, rcx
        MOV esi, DWORD PTR [RBP - 4]
        MOV QWORD PTR [RBP - 56], rdi
        MOV rax, QWORD PTR [RBP - 56]
        MOV rax, [rax]
        CALL [rax + 8 * 0]

        MOV rdx, QWORD PTR [RBP - 12]
        ADD rdx, 16
        MOV rdx, QWORD PTR [rdx]
        MOV rdi, rdx
        MOV esi, DWORD PTR [RBP - 60]
        MOV QWORD PTR [RBP - 40], rdi
        MOV rax, QWORD PTR [RBP - 40]
        MOV rax, [rax]
        CALL [rax + 8 * 1]

        MOV rdi, QWORD PTR [RBP - 12]
        ADD rdi, 8
        MOV esi, DWORD PTR [RBP - 76]
        MOV QWORD PTR [rdi], rsi


        add rsp, 24
        popq r15
        popq r14
        popq r13
        popq r12
        popq rbx
        LEAVE
        RET
O_1:
        PUSH rbp
        MOV rbp, rsp
        SUB rsp, 32
        pushq rbx
        pushq r12
        pushq r13
        pushq r14
        pushq r15
        sub rsp, 24


        MOV QWORD PTR [RBP - 16], rdi

        MOV rax, QWORD PTR [RBP - 16]
        ADD rax, 8
        MOV rax, QWORD PTR [rax]
        MOV ebx, 2
        IMUL ebx, eax
        MOV ecx, 3
        MOV DWORD PTR [RBP - 8], ebx
        IMUL ebx, ecx
        MOV eax, ebx
        JMP CGL_0
CGL_0:


        add rsp, 24
        popq r15
        popq r14
        popq r13
        popq r12
        popq rbx
        LEAVE
        RET
P_1:
        PUSH rbp
```

```
	MOV rbp, rsp
	SUB rsp, 48
	pushq rbx
	pushq r12
	pushq r13
	pushq r14
	pushq r15
	sub rsp, 24


	MOV QWORD PTR [RBP - 28], rdi

	MOV rax, QWORD PTR [RBP - 28]
	ADD rax, 8
	MOV rax, QWORD PTR [rax]
	MOV rbx, QWORD PTR [RBP - 28]
	ADD rbx, 8
	MOV rbx, QWORD PTR [rbx]
	MOV DWORD PTR [RBP - 20], eax
	IMUL eax, ebx
	MOV ecx, 3
	MOV DWORD PTR [RBP - 4], eax
	IMUL eax, ecx
	MOV DWORD PTR [RBP - 44], ebx
	MOV ebx, eax
	MOV eax, ebx
	JMP CGL_1
CGL_1:


	add rsp, 24
	popq r15
	popq r14
	popq r13
	popq r12
	popq rbx
	LEAVE
	RET
toString_2:
	PUSH rbp
	MOV rbp, rsp
	SUB rsp, 48
	pushq rbx
	pushq r12
	pushq r13
	pushq r14
	pushq r15
	sub rsp, 24


	MOV QWORD PTR [RBP - 16], rdi

	MOV al, 67
	MOV sil, al
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV bl, 105
	MOV sil, bl
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV cl, 114
	MOV sil, cl
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV dl, 99
	MOV sil, dl
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV dil, 108
	MOV sil, dil
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV sil, 101
	MOV sil, sil
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV r8b, 40
	MOV sil, r8b
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV r9, QWORD PTR [RBP - 16]
	ADD r9, 8
	MOV r9, QWORD PTR [r9]
	MOV DWORD PTR [RBP - 20], r9d
	MOV esi, r9d
	LEA rdi, [rip +
write_number_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV r10b, 44
	MOV sil, r10b
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV r11b, 32
	MOV sil, r11b
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV r12, QWORD PTR [RBP - 16]
	ADD r12, 16
	MOV r12, QWORD PTR [r12]
	MOV rdi, r12
	MOV QWORD PTR [RBP - 28], rdi
	MOV r13, QWORD PTR [RBP - 28]
	MOV r13, [r13]
	CALL [r13 + 8 * 2]

	MOV r14b, 41
	MOV sil, r14b
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf


	add rsp, 24
	popq r15
	popq r14
	popq r13
```

```
        popq r12
        popq rbx
        LEAVE
        RET
O_2:
        PUSH rbp
        MOV rbp, rsp
        SUB rsp, 32
        pushq rbx
        pushq r12
        pushq r13
        pushq r14
        pushq r15
        sub rsp, 24


        MOV QWORD PTR [RBP - 12], rdi

        MOV rax, QWORD PTR [RBP - 12]
        ADD rax, 8
        MOV rax, QWORD PTR [rax]
        MOV ebx, 4
        IMUL ebx, eax
        MOV eax, ebx
        JMP CGL_2
CGL_2:



        add rsp, 24
        popq r15
        popq r14
        popq r13
        popq r12
        popq rbx
        LEAVE
        RET
P_2:
        PUSH rbp
        MOV rbp, rsp
        SUB rsp, 48
        pushq rbx
        pushq r12
        pushq r13
        pushq r14
        pushq r15
        sub rsp, 24


        MOV QWORD PTR [RBP - 16], rdi

        MOV rax, QWORD PTR [RBP - 16]
        ADD rax, 8
        MOV rax, QWORD PTR [rax]
        MOV rbx, QWORD PTR [RBP - 16]
        ADD rbx, 8
        MOV rbx, QWORD PTR [rbx]
        MOV DWORD PTR [RBP - 32], eax
        IMUL eax, ebx
        MOV DWORD PTR [RBP - 28], ebx
        MOV ebx, eax
        MOV eax, ebx
        JMP CGL_3
CGL_3:



        add rsp, 24
        popq r15
        popq r14
        popq r13
        popq r12
        popq rbx
        LEAVE
        RET
toString_3:
        PUSH rbp
        MOV rbp, rsp
        SUB rsp, 48
        pushq rbx
        pushq r12
        pushq r13
        pushq r14
        pushq r15
        sub rsp, 24


        MOV QWORD PTR [RBP - 24], rdi

        MOV al, 83
        MOV sil, al
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV bl, 113
        MOV sil, bl
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV cl, 117
        MOV sil, cl
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV dl, 97
        MOV sil, dl
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV dil, 114
        MOV sil, dil
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV sil, 101
        MOV sil, sil
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV r8b, 40
        MOV sil, r8b
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV r9, QWORD PTR [RBP - 24]
        ADD r9, 8
        MOV r9, QWORD PTR [r9]
        MOV DWORD PTR [RBP - 28], r9d
        MOV esi, r9d
        LEA rdi, [rip +
write_number_format]
```

```
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV r10b, 44
	MOV sil, r10b
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV r11b, 32
	MOV sil, r11b
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf
	MOV r12, QWORD PTR [RBP - 24]
	ADD r12, 16
	MOV r12, QWORD PTR [r12]
	MOV rdi, r12
	MOV QWORD PTR [RBP - 40], rdi
	MOV r13, QWORD PTR [RBP - 40]
	MOV r13, [r13]
	CALL [r13 + 8 * 2]

	MOV r14b, 41
	MOV sil, r14b
	LEA rdi, [rip +
write_character_format]
	XOR eax, eax
	CALL printf



	add rsp, 24
	popq r15
	popq r14
	popq r13
	popq r12
	popq rbx
	LEAVE
	RET
main:
	PUSH rbp
	MOV rbp, rsp
	SUB rsp, 112
	pushq rbx
	pushq r12
	pushq r13
	pushq r14
	pushq r15
	sub rsp, 24




	MOV rdi, 10
	MOV rsi, 8
	XOR eax, eax
	CALL calloc
	MOV shapes, rax

	LEA rdi, [rip +
read_character_format]
	LEA rsi, BYTE PTR [RBP - 17]
	XOR eax, eax
	CALL scanf
CGL_4:
	MOV al, BYTE PTR [RBP - 17]
	MOV bl, 46
	CMP al, bl
	JE CGL_5
	MOV eax, index
	MOV ebx, 10
	CMP eax, ebx
	JGE CGL_5
	MOV al, BYTE PTR [RBP - 17]
	MOV bl, 99
	CMP al, bl
	JNE L0
	JMP L1
L0:
	MOV al, BYTE PTR [RBP - 17]
	MOV bl, 67
	CMP al, bl
	JNE L2
L1:
	LEA rdi, [rip +
read_number_format]
	LEA rsi, DWORD PTR [RBP - 8]
	XOR eax, eax
	CALL scanf
	LEA rdi, [rip +
read_number_format]
	LEA rsi, DWORD PTR [RBP - 12]
	XOR eax, eax
	CALL scanf
	LEA rdi, [rip +
read_number_format]
	LEA rsi, DWORD PTR [RBP - 16]
	XOR eax, eax
	CALL scanf
	MOV rdi, 20
	MOV rsi, 1
	XOR eax, eax
	CALL calloc
	MOV QWORD PTR [rax], OFFSET
_vft_Circle
	MOV QWORD PTR [RBP - 30], rax

	MOV rax, shapes
	MOVSXD rbx, index
	MOV rcx, QWORD PTR [RBP - 30]
	MOV QWORD PTR [rax + 8 * rbx],
rcx
	MOV rdx, QWORD PTR [rax + 8 *
rbx]
	MOV rdi, rdx
	MOV esi, DWORD PTR [RBP - 8]
	MOV QWORD PTR [RBP - 40], rdi
	MOV edx, DWORD PTR [RBP - 12]
	MOV QWORD PTR [RBP - 30], rcx
	MOV ecx, DWORD PTR [RBP - 16]
	MOV rax, QWORD PTR [RBP - 40]
	MOV rax, [rax]
	CALL [rax + 8 * 0]

	JMP L7
L2:
	MOV al, BYTE PTR [RBP - 17]
	MOV bl, 115
	CMP al, bl
	JNE L3
	JMP L4
L3:
	MOV al, BYTE PTR [RBP - 17]
	MOV bl, 83
	CMP al, bl
	JNE L5
L4:
```

```
        LEA rdi, [rip +
read_number_format]
        LEA rsi, DWORD PTR [RBP - 8]
        XOR eax, eax
        CALL scanf
        LEA rdi, [rip +
read_number_format]
        LEA rsi, DWORD PTR [RBP - 12]
        XOR eax, eax
        CALL scanf
        LEA rdi, [rip +
read_number_format]
        LEA rsi, DWORD PTR [RBP - 16]
        XOR eax, eax
        CALL scanf
        MOV rdi, 20
        MOV rsi, 1
        XOR eax, eax
        CALL calloc
        MOV QWORD PTR [rax], OFFSET
_vft_Square
        MOV QWORD PTR [RBP - 96], rax

        MOV rax, shapes
        MOVSXD rbx, index
        MOV rcx, QWORD PTR [RBP - 96]
        MOV QWORD PTR [rax + 8 * rbx],
rcx
        MOV rdx, QWORD PTR [rax + 8 *
rbx]
        MOV rdi, rdx
        MOV esi, DWORD PTR [RBP - 8]
        MOV QWORD PTR [RBP - 108], rdi
        MOV edx, DWORD PTR [RBP - 12]
        MOV QWORD PTR [RBP - 96], rcx
        MOV ecx, DWORD PTR [RBP - 16]
        MOV rax, QWORD PTR [RBP - 108]
        MOV rax, [rax]
        CALL [rax + 8 * 0]

        JMP L6
L5:
        JMP CGL_5
L6:
L7:
        MOV rax, shapes
        MOVSXD rbx, index
        MOV rcx, QWORD PTR [rax + 8 *
rbx]
        MOV rdi, rcx
        MOV QWORD PTR [RBP - 72], rdi
        MOV rax, QWORD PTR [RBP - 72]
        MOV rax, [rax]
        CALL [rax + 8 * 1]
        MOV DWORD PTR [RBP - 21], eax

        MOV edx, O
        MOV edi, DWORD PTR [RBP - 21]
        ADD edx, edi
        MOV DWORD PTR [RBP - 56], edx
        MOV rsi, shapes
        MOVSXD r8, index
        MOV r9, QWORD PTR [rsi + 8 *
r8]
        MOV DWORD PTR [RBP - 21], edi
        MOV rdi, r9
        MOV QWORD PTR [RBP - 64], rdi
        MOV O, edx
        MOV r10, QWORD PTR [RBP - 64]
        MOV r10, [r10]
        CALL [r10 + 8 * 2]
        MOV DWORD PTR [RBP - 100], eax

        MOV r11d, P
        MOV r12d, DWORD PTR [RBP - 100]
        ADD r11d, r12d
        MOV DWORD PTR [RBP - 76], r11d
        MOV r13d, index
        MOV r14d, 1
        ADD r13d, r14d
        MOV P, r11d
        MOV index, r13d
        LEA rdi, [rip +
read_character_format]
        LEA rsi, BYTE PTR [RBP - 17]
        XOR eax, eax
        CALL scanf
        JMP CGL_4
CGL_5:
        MOV eax, 0
        MOV DWORD PTR [RBP - 4], eax
CGL_6:
        MOV eax, DWORD PTR [RBP - 4]
        MOV ebx, index
        CMP eax, ebx
        JGE CGL_7
        MOV rax, shapes
        MOVSXD rbx, DWORD PTR [RBP - 4]
        MOV rcx, QWORD PTR [rax + 8 *
rbx]
        MOV rdi, rcx
        MOV QWORD PTR [RBP - 88], rdi
        MOV rax, QWORD PTR [RBP - 88]
        MOV rax, [rax]
        CALL [rax + 8 * 3]

        MOV edi, 10
        CALL chr_0
        MOV BYTE PTR [RBP - 41], al

        MOV dl, BYTE PTR [RBP - 41]
        MOV sil, dl
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
L8:
        MOV edi, DWORD PTR [RBP - 4]
        MOV esi, 1
        ADD edi, esi
        MOV DWORD PTR [RBP - 4], edi
        JMP CGL_6
CGL_7:
        MOV eax, index
        MOV ebx, 0
        CMP eax, ebx
        JLE L9
        MOV eax, O
        CDQ
        MOV ebx, index
        IDIV ebx
        MOV ecx, eax
        MOV DWORD PTR [RBP - 52], ecx
        MOV O, ecx
        MOV eax, P
        CDQ
```

```
        IDIV ebx
        MOV ecx, eax
        MOV DWORD PTR [RBP - 45], ecx
        MOV P, ecx
L9:
        MOV al, 79
        MOV sil, al
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV bl, 32
        MOV sil, bl
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV cl, 61
        MOV sil, cl
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV dl, 32
        MOV sil, dl
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV edi, O
        MOV esi, edi
        LEA rdi, [rip +
write_number_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV edi, 10
        CALL chr_0
        MOV BYTE PTR [RBP - 22], al

        MOV sil, BYTE PTR [RBP - 22]
        MOV sil, sil
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV r8b, 80
        MOV sil, r8b
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV r9b, 32
        MOV sil, r9b
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV r10b, 61
        MOV sil, r10b
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV r11b, 32
        MOV sil, r11b
        LEA rdi, [rip +
write_character_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf
        MOV r12d, P
        MOV esi, r12d
        LEA rdi, [rip +
write_number_format]
        XOR eax, eax
        CALL printf


        add rsp, 24
        popq r15
        popq r14
        popq r13
        popq r12
        popq rbx
        LEAVE
        RET
```

7.3 Граматика језика и лексичке структуре

```
Program            = "program" ident {ConstDecl | VarDecl | AbstractClassDecl | ClassDecl } "{"
                     {MethodDecl} "}".
ConstDecl          = "const" Type ident"="(numConst | charConst | boolConst) {, ident "="
                     (numConst | charConst | boolConst)} ";".
VarDecl            =  Type ident ["[" "]"] {"," ident ["[" "]"]} ";".
ClassDecl          =  "class" ident ["extends" Type] "{"  {VarDecl}  ["{" {MethodDecl} "}"]  "}".
AbstractClassDecl  =  "abstract" "class" ident ["extends" Type] "{"  {VarDecl}  ["{" {MethodDecl |
                      AbstractMethodDecl} "}"]  "}".
MethodDecl         =  (Type | "void") ident "(" [FormPars] ")" {VarDecl} "{" {Statement} "}".
AbstractMethodDecl = "abstract" (Type | "void") ident "(" [FormPars] ")" ";"
FormPars           =  Type ident ["[" "]"] {"," Type ident ["[" "]"]}.
Type               = ident.
Statement          = DesignatorStatement  ";"
                   | "if" "(" Condition ")" Statement ["else" Statement]
                   | "for" "(" [DesignatorStatement ] ";" [Condition] ";" [DesignatorStatement] ")"
                   Statement
                   |  "break" ";"
                   |  "continue" ";"
                   |   "return" [Expr] ";"
                   | "read" "(" Designator ")" ";"
                   | "print" "(" Expr ["," numConst] ")" ";"
                   |   "{" {Statement} "}".
DesignatorStatement =  Designator (Assignop Expr | "(" [ActPars] ")" | "++" | "--")
ActPars            = Expr {"," Expr}.
Condition          =  CondTerm {"||" CondTerm}.
CondTerm           =  CondFact  {"&&" CondFact}.
CondFact           = Expr [Relop Expr].
Expr               = ["-"] Term {Addop Term}.
Term               = Factor {Mulop Factor}.
Factor             =  Designator ["(" [ActPars] ")"]
                   | numConst
                   | charConst
                   | boolConst
                   | "new" Type ["[" Expr "]"]
                   |   "(" Expr ")".
Designator         = ident {"." ident | "[" Expr "]"}.
Assignop           = "=".
Relop              = "==" | "!=" | ">" | ">=" | "<" | "<=".
Addop              = "+" | "-".
Mulop              = "*" | "/" | "%".
```

Ključne reči:	program, break, class, abstract, else, const, if, new, print, read, return, void, for, extends, continue
Vrste tokena :	ident = letter {letter | digit | "_"}. numConst = digit {digit}. charConst = "'" printableChar "'". boolConst = ("true" | "false").
Operatori:	+, -, *, /, %, ==, !=, >, >=, <, <=, &&, ||, =, ++, --, ;, zarez, ., (,), [,], {, }
Komentari:	// do kraja linije

9. Литература

[ALSU06] A. V. Aho, M. S. Lam, R. Sethi, J. D. Ullman, *Compilers: Principles, Techniques, and Tools*. Addison-Wesley, Reading, MA, second edition, 2006.

[AMD64_1] Advanced Micro Devices, *AMD64 Architecture Programmer's Manual Volume 1: Application Programming*, Revision 3.22, December 2017

[App02] A. W. Appel, *Modern Compiler Implementation in Java,* Cambridge University Press, second edition, 2004.

[Avr10] N. Avramović, D. Bojić, *Jednostavan generator kôda za MikroJavu*. Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2010.

[Boj11] D. Bojić, *Materijali za predavanja i vežbe iz predmeta „Programski prevodioci 1"*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2011.

[Fog20] A. Fog, *The microarchitecture of Intel, AMD and VIA CPUs: An optimization guide for assembly programmers and compiler makers,* Technical University of Denmark, 2020.

[GNUas] GNU Project, *Using as.*

[KCLT12] K. Cooper, L. Torczon, *Engineering a Compiler*, Morgan Kaufmann, Burlingon, MA, second edition, 2012.

[LLVM_IR] The LLVM Foundation, *LLVM Compiler Infrastructure Language Reference.*

[MIT6.172] C. Leiserson, J. Shun, *6.172 Performance Engineering of Software Systems*. Fall 2018. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare.

[TOP500] The TOP500 Project
https://www.top500.org/lists/top500/2020/06/

[ZSR] Z. S. Rakić, *Materijali za predavanja i vežbe iz predmeta „Programski prevodioci"*, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.

10. Списак коришћених слика

Слика 1 S. Cherubin, *Compiler design*, 2016, CC BY-SA 3.0
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cc/Compiler_design.svg/1024px-Compiler_design.svg.png

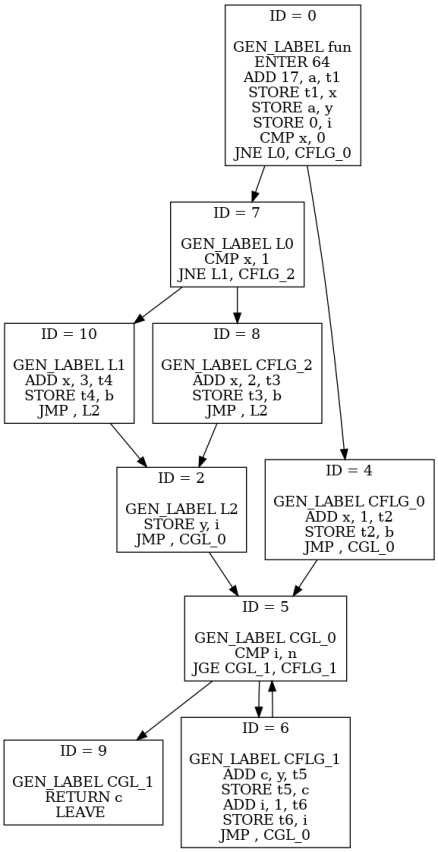
Слика 2, 3 A. V. Aho, M. S. Lam, R. Sethi, J. D. Ullman, *Compilers: Principles, Techniques, and Tools*. Addison-Wesley, Reading, MA, second edition, 2006.

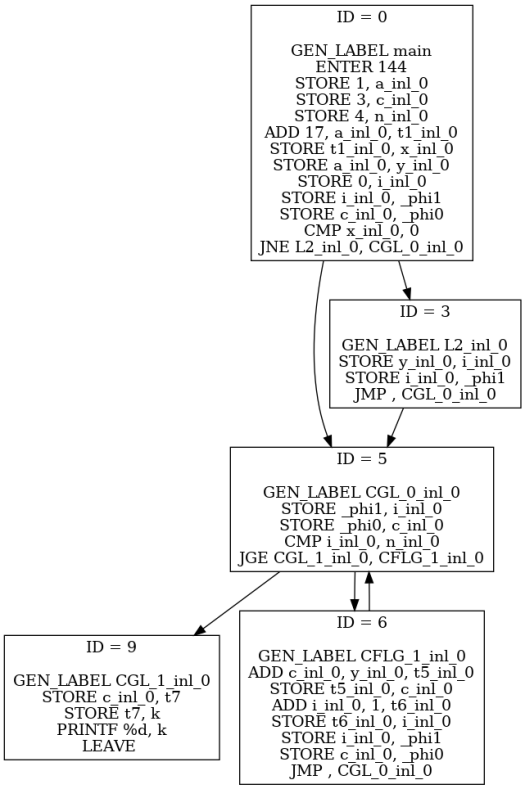
Слика 4 K. Cooper, L. Torczon, *Engineering a Compiler*, Morgan Kaufmann, Burlingon, MA, second edition, 2012.

Додатак А – примери међукôда пре и после оптимизовања

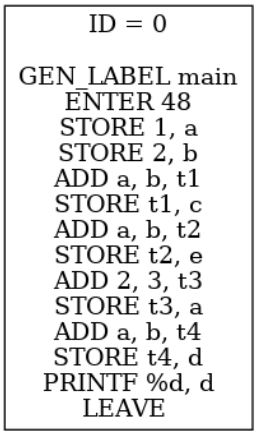
У следећим примерима све слике са леве стране представљају преглед међукôда пре оптимизовања, док све слике са десне стране приказују међукôд после оптимизовања. Редослед оптимизационих пролаза је: LVN, Function Inlining, CFG Optimization, SSA Form Generation, Uninitialized Variable Detection, Loop Invariant Code Motion, CFG Optimization, Dead Code Elimination, CFG Optimization, SSA to Normal Form Conversion.

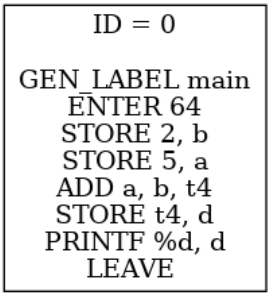
Пример 1



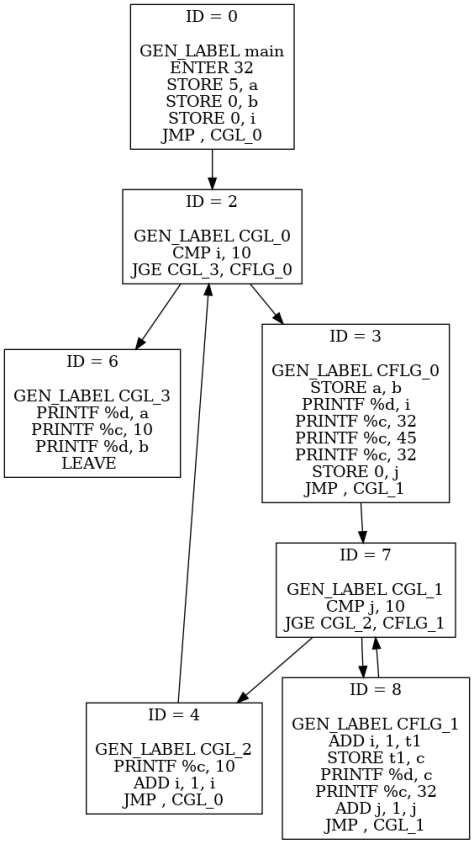


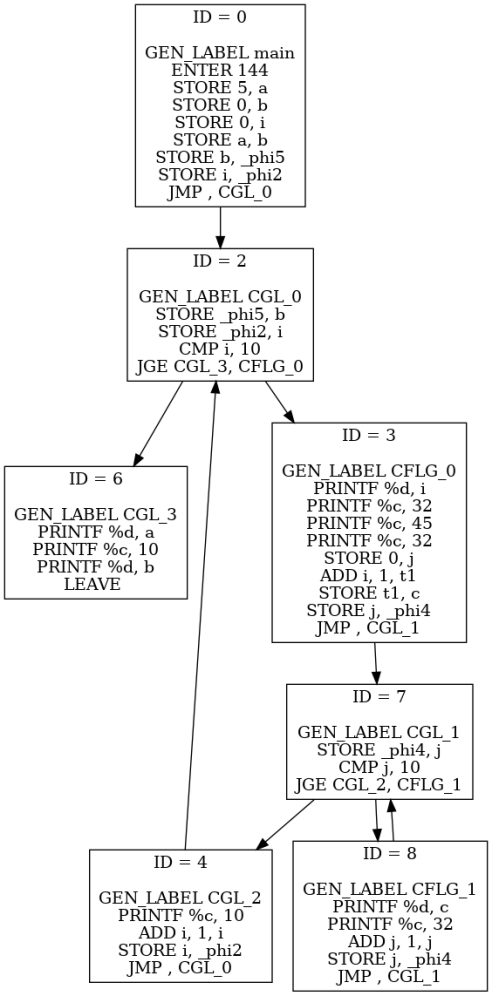
Пример 2





Пример 3


ID = 0
GEN_LABEL main
ENTER 32
STORE 5, a
STORE 0, b
STORE 0, i
JMP , CGL_0
ID = 2
GEN_LABEL CGL_0
CMP i, 10
JGE CGL_3, CFLG_0
ID = 6
GEN_LABEL CGL_3
PRINTF %d, a
PRINTF %c, 10
PRINTF %d, b
LEAVE
ID = 3
GEN_LABEL CFLG_0
STORE a, b
PRINTF %d, i
PRINTF %c, 32
PRINTF %c, 45
PRINTF %c, 32
STORE 0, j
JMP , CGL_1
ID = 7
GEN_LABEL CGL_1
CMP j, 10
JGE CGL_2, CFLG_1
ID = 4
GEN_LABEL CGL_2
PRINTF %c, 10
ADD i, 1, i
JMP , CGL_0
ID = 8
GEN_LABEL CFLG_1
ADD i, 1, t1
STORE t1, c
PRINTF %d, c
PRINTF %c, 32
ADD j, 1, j
JMP , CGL_1


ID = 0
GEN_LABEL main
ENTER 144
STORE 5, a
STORE 0, b
STORE 0, i
STORE a, b
STORE b, _phi5
STORE i, _phi2
JMP , CGL_0
ID = 2
GEN_LABEL CGL_0
STORE _phi5, b
STORE _phi2, i
CMP i, 10
JGE CGL_3, CFLG_0
ID = 6
GEN_LABEL CGL_3
PRINTF %d, a
PRINTF %c, 10
PRINTF %d, b
LEAVE
ID = 3
GEN_LABEL CFLG_0
PRINTF %d, i
PRINTF %c, 32
PRINTF %c, 45
PRINTF %c, 32
STORE 0, j
ADD i, 1, t1
STORE t1, c
STORE j, _phi4
JMP , CGL_1
ID = 7
GEN_LABEL CGL_1
STORE _phi4, j
CMP j, 10
JGE CGL_2, CFLG_1
ID = 4
GEN_LABEL CGL_2
PRINTF %c, 10
ADD i, 1, i
STORE i, _phi2
JMP , CGL_0
ID = 8
GEN_LABEL CFLG_1
PRINTF %d, c
PRINTF %c, 32
ADD j, 1, j
STORE j, _phi4
JMP , CGL_1