



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО
И ГРАЂЕВИНАРСТВО
У КРАЉЕВУ



мр Горан Михајловић

***УТИЦАЈНИ ПАРАМЕТРИ НА РАДНУ СПОСОБНОСТ
ОСЦИЛАТОРНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПЛАТФОРМИ
ЗА ПРОСЕЈАВАЊЕ ВЛАЖНИХ МАТЕРИЈАЛА***

*** докторска дисертација ***

Краљево, 2017.

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА

I. АУТОР	
<i>Име и презиме:</i>	мр Горан Михајловић
<i>Датум и место рођења:</i>	24.09.1963., Трстеник, Република Србија
<i>Садашње радно место:</i>	професор струковних студија на Високој техничкој машинској школи струковних студија у Трстенику
II. ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА	
<i>Наслов:</i>	Утицајни параметри на радну способност осцилаторних транспортних платформи за просејавање влажних материјала
<i>Број страница:</i>	112
<i>Број слика:</i>	27
<i>Број наведених библиографских референци:</i>	50
<i>Назив установе и назив места где је дисертација одбрањена:</i>	Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитета у Крагујевцу, Краљево
<i>Научна област (УДК):</i>	Механизација и носеће конструкције, транспортна техника / транспортни уређаји (621.86/87)
<i>Ментор:</i>	др Миломир Гашић, редовни професор, члан Руске академије наука, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Катедра за конструкције и пројектовање у машиноградњи
III. ОЦЕНА И ОДБРАНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ	
<i>Број одлуке и датум прихватања теме докторске дисертације:</i>	540/8 16.05.2013.
<i>Комисија за оцену подобности теме и кандидата:</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. др Звонимир Југовић, редовни професор, Факултет техничких наука у Чачку (ужа научна област: Конструкционо машинство); 2. др Драгослав Јаношевић, редовни професор, Машински факултет у Нишу (ужа научна област: Транспортна техника и логистика); 3. др Миле Савковић, редовни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву (ужа научна област: Механизација и носеће конструкције); 4. др Радован Булатовић, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву (ужа научна област: Механика и механизми); 5. др Миломир Гашић, редовни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву (ужа научна област: Механизација и носеће конструкције).
<i>Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. др Драгослав Јаношевић, редовни професор, председник, Машински факултет у Нишу; 2. др Миле Савковић, редовни професор, члан, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву; 3. др Бранко Тадић, редовни професор, члан, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу.
<i>Датум одбране дисертације:</i>	

УТИЦАЈНИ ПАРАМЕТРИ НА РАДНУ СПОСОБНОСТ ОСЦИЛАТОРНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПЛАТФОРМИ ЗА ПРОСЕЈАВАЊЕ ВЛАЖНИХ МАТЕРИЈАЛА

РЕЗИМЕ

Код постојећих машина и уређаја за транспортовање чврсте масе помоћу осцилаторних платформи, основни захтеви које треба испунити у току рада јесу: максималан транспорт, максимално разбијање (уситњавање) и максимална сепарација (издвајање) појединих компоненетних састојака из чврсте масе.

Позната је чињеница да је влажност земљишне масе w исказана у % један од најутицајнијих фактора од кога зависе њен транспорт, сепарација и просејавање кроз решетку (сито) осцилаторне платформе. Најбољи радни ефекти постижу се при раду са сувом и меком земљом без присуства чврстих грудви. Таква земљана маса коришћена је у току експерименталне фазе истраживања, коју је аутор дисертације реализовао на прототипу осцилаторне платформе на Техничком факултету у Чачку и на Институту за кромпир у Гучи, за време израде свог магистарског рада 1995. године [1]. Под таквим околностима платформа је увек беспрекорно обављала предвиђену радну функцију.

Међутим, искуство из експлоатације стечено у протекле две деценије показало је да проблеми у раду осцилаторне платформе наступају након обилних киша, тј. онда када се влажност земље w јако повећа. Тада је ефекат транспорта и сепарације најслабији, због лепљења влажне земље за раоник који је у том случају веома тешко подкопава. У појединим екстремним случајевима, долазило је и до потпуног онемогућавања рада платформе.

Од почетка шездесетих година прошлог века, већи број аутора у свету бавио се конкретном проблематиком повећања радне способности платформе, махом намењених за ситнозрнасте и суве материјале. Теоријске основе рада оваквих платформи могу се наћи у одговарајућој литератури [2, 3, 4]. Њихови физички модели имали су свој развојни - дијалектички пут и то почев од најједноставнијих са једном или две масе међусобно повезане еластичним везама [5, 6], па до најсложенијих модела код којих је извршена оптимизација најутицајнијих радних параметара [7, 8, 9, 10]. Међутим, сви наведени модели односе се углавном на транспортовање суве, најчешће земљане масе и исти могу бити добра полазна основа за формирање модела осцилаторних платформи за транспорт влажних материјала.

Стога је аутор дисертације дошао на идеју да обави једно ново теоријско и практично истраживање споменуте проблематике, којим би се установило какав би био рад осцилаторне платформе у екстремно тешким радним условима и то код максимално влажне и пластичне земље (тзв. "тешке иловаче").

Истраживањем је требало прихватити или одбацити постављене хипотезе, имајући у виду све релевантне факторе тј. параметре који утичу на рад осцилаторних платформи.

Након реализације целокупног истраживања које је спроведено у две фазе-теоријској и експерименталној, приступило се елаборацији и анализи добијених резултата. Потом су уследили табелирање и презентација добијених резултата, како би исти били доступни што ширем кругу потенцијалних корисника.

Резултати и закључци добијени једним оваквим комплексним истраживањем сигурно би могли корисно послужити за модификацију већ постојећих, а такође и за израду потпуно нових машина и уређаја које у свом раду користе осцилаторне платформе за сепарацију и просејавање влажне земљишне масе. Стога су на крају ове дисертације и изнети конкретни предлози и препоруке за нека нова, будућа истраживања споменуте проблематике.

Кључне речи: вишефакторни ортогонални план експеримента, влажна земљишна маса, математички модел, осцилаторна транспортна платформа, просејавање, радни параметри, сепарација.

INFLUENTIAL PARAMETERS ON WORKING PERFORMANCE OF THE OSCILLATORY TRANSPORTING PLATFORMS FOR SIEVING MOIST MATERIALS

S U M M A R Y

For existing machines and devices for transporting solid mass using oscillatory platforms, the basic requirements that must be met during operation are: maximal transportation, maximal breaking (fragmentation) and maximal separation (segregation) of each component from the solid mass.

It is known a fact that the humidity of the land mass w expressed in % is one of the most influential factors from which depends its transportation, separation and sieving through the grille (sieve) of oscillatory platform. The best working effects are achieved when working with dry and soft earth without the presence of solid pieces. Such land mass was used during the experimental phase of the research, which the author of the dissertation realized on the prototype of oscillatory platform at the Technical Faculty in Čačak and at the Institute of potato in Guča, during the drafting his MA thesis in 1995. [1]. Under such circumstances, the platform was always perfectly performed anticipated operating function.

However, the experience acquired from the exploitation in the past two decades has shown that problems in the work of oscillatory platforms appear after heavy rains, i.e. when the soil moisture w is greatly increased. Then the effect of transportation and separation is the weakest, due to sticking moist earth for ploughshare, because the ploughshare in this case a very hard to undermines moist eart. In some extreme cases, occurred a complete disabling work of the platform.

Since the beginning of the sixties the last century, great number of authors in the world dealt with the specific problems of increasing the working abilities of platforms, mainly intended for fine-grained and dry materials. Theoretical basis of operation of these platforms can be found in the relevant literature [2, 3, 4]. Their physical models had their developmental-dialectical trend starting from the simplest with one or two masses interconnected by elastic connections [5, 6], to the most complex models which have been subjected to optimization of the most influential operating parameters [7, 8, 9, 10]. However, all mentioned models relate mainly to the transport of dry, mostly earthen mass and they may be a good starting point for creation of models the oscillatory platforms for transportation of moist material.

Therefore, the author of the dissertation got the idea to do a new theoretical and practical research the mentioned problems, by which it can be established what would be the work of oscillatory platform in extremely difficult working conditions, primarily in the case of maximal wet and plastic land mass (so called "heavy loam").

By using investigations, it was to be accept or reject the proposed hypotheses, having in mind all relevant factors, i.e. parameters which affect the work of oscillatory platform.

After realization of whole research, which was conducted in two phases - theoretical and experimental, next step was elaboration and analysis the obtained results. Then followed the tabulation and presentation the obtained results, with the aim that they be available to a wider range of potential users.

The results and conclusions obtained by means one such complex research can surely serve useful for modification already existing, and also for the development of a completely new machines and devices which in their work using oscillatory platforms for separation and sieving of wet land mass. Therefore, some particular proposals and recommendations are listed at the end of this dissertation for a new, future research the aforementioned problems.

Keywords: mathematical model, multifactor orthogonal plan of the experiment, operating parameters, oscillatory transporting platform, separation, sieving, wet land mass.

НАЗИВ СЛИКЕ / NAME OF THE FIGURE

Сл. 1. Општа шема вибрационе осцилаторне платформе	Fig. 1. General scheme of vibrating oscillatory platform
Сл. 2. Пример примене вибрационе осцилаторне платформе код технолошког система за сепарацију и просејавање песка из речног корита	Fig. 2. The example of vibrating oscillatory platform applied to the technological system for separating and sieving sand from the river bed
Сл. 3. Разне врсте вибрационих осцилаторних платформи	Fig. 3. Various types of vibrating oscillatory platforms
Сл. 4. Шематски приказ једносите вибрационе осцилаторне платформе примењене у пољопривреди	Fig. 4. Schematic view of the mono-grid vibrating oscillatory platform that is applied in agriculture
Сл. 5. Кинематске карактеристике осцилаторног кретања материјалне тачке	Fig. 5. Kinematic characteristics of the oscillatory motion of material point
Сл. 6. Анализа сила које делују на честицу при одбацавању материјала	Fig. 6. Analysis of the forces acting on the particle during the rejection of the material
Сл. 7. Убрзања решетке (платформе) при режиму рада са одбацавањем материјала	Fig. 7. Accelerations of the grid (platform) during operating mode with rejection of the material
Сл. 8. Кинематски дијаграми платформе по В. А. Олевском	Fig. 8. Kinematic diagrams of the platform according to V. A. Olevski
Сл. 9. Одбацавање честице од платформе (коси хитац)	Fig. 9. The rejection of particle from the platform (oblique shot)
Сл. 10. Блок шема утицајних фактора на транспортовање наслага (слојева) земљишне масе дуж решетке осцилаторне платформе	Fig. 10. Block diagram of the influencing factors on the transport of land mass sediments (stratums) along the grid of oscillating platform
Сл. 11. Блок шема утицајних фактора на транспортовање изолованих тела (грумења земље) дуж решетке осцилаторне платформе	Fig. 11. Block diagram of the influencing factors on the transport of isolated bodies (nuggets of land) along the grid of oscillating platform
Сл. 12. Блок шема утицајних фактора на сепарацију земљишне масе кроз решетку осцилаторне платформе	Fig. 12. Block diagram of the influencing factors on separation of land mass through the grid of oscillating platform
Сл. 13. Шематски приказ двосите вибрационе осцилаторне платформе примењене у пољопривреди	Fig. 13. Schematic view of the duo-grid vibrating oscillatory platform that is applied in agriculture
Сл. 14. Експерименталне променљиве које утичу на радни учинак (производност) вибрационе осцилаторне платформе	Fig. 14. Experimental variables that affecting the performance (productivity) of vibrating oscillatory platform
Сл. 15. Шематски и графички приказ процеса сепарације влажне земљишне масе помоћу осцилаторне транспортне платформе	Fig. 15. Schematic and graphical shew of the processes of separation of wet land mass by using oscillating transport platform

Сл. 16. Структурна шема отвореног система О-П-РП (окружење-платформарадни параметри)	Fig. 16. Structure scheme of an open system E-P-WP (environment-platform-working parameters)
Сл. 17. Структурна шема затвореног система О-П-РП (окружење-платформарадни параметри)	Fig. 17. Structure scheme of the closed system E-P-WP (environment-platform-working parameters)
Сл. 18. Одзив осцилаторне транспортне платформе која врши сепарацију влажне земљишне масе на поремећај изазван одскачком побудном функцијом	Fig. 18. The response of oscillatory transport platform that performs the separation of wet land mass due to disorder that is caused by jumping causal function
Сл. 19. ПН-дијаграм осцилаторне транспортне платформе која врши сепарацију влажне земљишне масе	Fig. 19. PN-diagram of oscillatory transport platform that performs the separation of wet land mass
Сл. 20. Одзив осцилаторне транспортне платформе која врши сепарацију влажне земљишне масе на поремећај изазван хармонијском побудном функцијом	Fig. 20. The response of oscillatory transport platform that performs the separation of wet land mass upon disturbance caused by harmonic excitation function
Сл. 21. Поларни дијаграм карактеристике учестаности $G(j\omega)$ осцилаторне транспортне платформе која врши сепарацију влажне земљишне масе	Fig. 21. Polar diagram of the frequency characteristic $G(j\omega)$ of oscillatory transport platform that performs the separation of wet land mass
Сл. 22. Могући положај полова преносне функције $G(p)$ у равни комплексне променљиве $p=c+j\omega$	Fig. 22. The possible location of the poles of transmissional function $G(p)$ in the plane of the complex variable $p=c+j\omega$
Сл. 23. Карактеристични одзиви система за могуће случајеве наведене у табели Т.4.3	Fig. 23. The typical system responses for possible cases listed in Table T.4.3
Сл. 24. Зависност коефицијента потпуности (финоће) сепарације од брзине осциловања платформе	Fig. 24. Dependence of the coefficient of completeness (fineness) of separation of the speed of oscillation the platform
Сл. 25. Методологија реализације експеримената	Fig. 25. The methodology of realization of experiments
Сл. 26. Трофакторни ортогонални план извођења експеримената	Fig. 26. Tripartite-factor orthogonal plan for performing the experiments
Сл. 27. Оптимизација радних параметара утицајних на сепарацију и просејавање влажне земљишне масе помоћу осцилаторне транспортне платформе	Fig. 27. Optimization of working parameters influencing on separation and sieving of wet land mass by means of oscillatory transporting platform

НАЗИВ ТАБЕЛЕ / NAME OF THE TABLE

T.4.1. <i>Поремећајне тест-функције</i>	T.4.1. <i>The disturbing test-function</i>
T.4.2. <i>Амплитудно-фазно-фреквентне карактеристике система О-П-РП за различите вредности побудних фреквенција ω</i>	T.4.2. <i>Amplitude-phase-frequency characteristics of the systems E-P-WP for different values of the excitation frequency ω</i>
T.4.3. <i>Могући одзиви са карактеристичним понашањем система</i>	T.4.3. <i>The possible responses with characteristic behavior of the system</i>
T.5.1. <i>Факторски нивои утицајних фактора у експерименту</i>	T.5.1. <i>Factor levels of influential factors in the experiment</i>
T.5.2. <i>План-матрица за извођење експеримената</i>	T.5.2. <i>Matrix-plan for performing experiments</i>
T.5.3. <i>Измерене вредности коефицијента η у току експеримената</i>	T.5.3. <i>The measured values of the coefficient η during experiments</i>
T.6.1. <i>Дисперзиона анализа – оцена сигнификантности утицајних фактора: w, d, Q_{sp} и адекватности математичког модела</i>	T.6.1. <i>Dispersive analysis - evaluation the significance of influential factors: w, d, Q_{sp} and adequacy of the mathematical model</i>
T.6.2. <i>Корелација улазно-излазних информација у току експерименталне фазе истраживања</i>	T.6.2. <i>Correlation of the input-output informations during the experimental phase of the research</i>

НОМЕНКЛАТУРА КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

• СИЛЕ И РЕАКЦИЈЕ [N] •

G – сила тежине;

F^{in} – сила инерције услед повратног (осцилаторног) кретања;

N – нормална реакција услед тежине честице чврсте масе;

F_{μ} – сила трења честице чврсте масе о решетку платформе;

F_w – дисипативна сила услед отпора ваздушне средине;

F_{Ω} – спољашња поремећајна (побудна) сила;

F_R – укупна радна сила у свим опругама платформе;

F_{ri} – радна сила у једној (i -тој) опрузи платформе.

• БРЗИНЕ [m/s] И УБРЗАЊА [m/s²] •

v_p – брзина решетки платформе;

u – брзина одбачене честице земљишне масе;

u_0 – почетна брзина одбачене честице;

v_{sr} – средња брзина померања слојева (наслага) земљишне масе по платформи;

v_g – брзина померања изолованих тела (грумења земље) по платформи;

g – убрзање земљине теже;

a – убрзање честице земљишне масе при осцилаторном кретању платформе;

a_p – убрзање решетки платформе при осцилаторном кретању платформе;

a_{pn} – нормална компонента убрзања решетки платформе при осцилаторном кретању платформе.

• ОСЦИЛАТОРНЕ ВЕЛИЧИНЕ ПЛАТФОРМЕ •

f – фреквенција-учестаност осциловања платформе [Hz];

ω – кружна фреквенција (кружна учестаност) осциловања платформе [1/s];

ω_b – сопствена кружна фреквенција (кружна учестаност) осциловања платформе [1/s];

Ω – кружна фреквенција (кружна учестаност) осциловања спољашње поремећајне силе [1/s];

T – период осциловања платформе [s];

n – број обртаја ексцентарског вратила платформе [min^{-1}];

A – амплитуда осциловања ексцентарског вратила платформе [m];

φ – фаза осциловања (угао обртања) ексцентарског вратила платформе [rad].

• **ДУЖИНСКЕ МЕРЕ [m], ВРЕМЕ [s], УГЛОВИ [°]** •

l – даљина лета честица земљишне масе одбачених од платформе;
 H – максимална висина лета честица земљишне масе одбачених од платформе;
 h – висина слојева земљишне масе дотурених на платформу;
 d – величина отвора (перфорација) на решетки платформе;
 r_d – растојање од центра тежине дебаланса до осе ротације ексцентарског вратила;
 t – време уопште (као независно променљива величина);
 t_{rp} – време реакције платформе;
 t_{op} – време одзива платформе;
 τ – време кашњења излазног-одзивног сигнала платформе (просејане влажне земље) у односу на улазни-побудни сигнал (дотурену влажну земљу);
 α – угао нагиба платформе према хоризонтали;
 β – угао транспорта платформе;
 γ – угао између правца осциловања платформе и хоризонтале.

• **КОЕФИЦИЈЕНТИ** •

μ – коефицијент трења клизања честице земље о решетку платформе;
 k_w – коефицијент влажности земље;
 k_h – коефицијент товарења тј. висине земљишног слоја дотуреног на платформу;
 K_τ – коефицијент кашњења просејане земље у односу на дотурену земљу;
 K_p – коефицијент (фактор) појачања платформе;
 N – коефицијент завистан од времена трајања лета одбачених честица земљишне масе;
 η – коефицијент потпуности (финоће) сепарације земље кроз решетку платформе;
 T_V – временска (инерцијална) константа платформе;
 $e^{-\tau p}$ – оператор кашњења платформе.

• **ПОБУДНЕ (ТЕСТ) ФУНКЦИЈЕ И ЊИХОВИ ОДЗИВИ, ПАРАМЕТРИ СИСТЕМА О-П-РП (ОКРУЖЕЊЕ-ПЛАТФОРМА-РАДНИ ПАРАМЕТРИ)** •

$\delta(t)$ – јединична импулсна (Диракова) функција;
 $x_o(t)$ – одскочна функција;
 $\sigma(t)$ – јединична одскочна функција;
 $r(t)$ – нагибна функција;
 $F_o \sin(\Omega t)$; $F_o \cos(\Omega t)$; – хармонијска функција;
 $g(t)$ – импулсни одзив на $\delta(t)$ функцију;
 $h(t)$ – функција прелаза тј. одзив на $x_o(t)$ и на $\sigma(t)$ функцију;
 $u(t)$ – нагибни одзив на $r(t)$ функцију;
 $F_o \sin(\Omega t + \varphi)$; $F_o \cos(\Omega t + \varphi)$ – хармонијски одзив на функцију $F_o \sin(\Omega t)$ или $F_o \cos(\Omega t)$.

• ОСТАЛЕ ОЗНАКЕ •

m – маса посматране земљишне честице [kg];

m_p – маса платформе [kg];

m_d – маса дебаланса за уравнотежење платформе [kg];

m_{red} – редукована маса свих трансаторно покретних делова платформе [kg];

c_r – рачунска вредност крутости лиснатих опруга платформе [N/m];

w – влажност земље [%];

Q_t – количина транспортоване земљишне масе помоћу платформе [m^3/s];

Q_1 – количина (напајање) дотурене влажне земљишне масе на платформу [m^3/s];

Q_2 – количина просејане влажне земљишне масе кроз решетку платформе [m^3/s];

Q^* – количина непросејане влажне земљишне масе кроз решетку платформе [m^3/s];

Q_{sp} – специфично напајање (дотур) влажне земљишне масе на платформу [$kg/(s \cdot m)$];

P – укупна површина решетке платформе кроз коју се врши просејавање влажне земљишне масе [m^2];

Q_t – количина земљишне масе транспортоване помоћу платформе [m^3/s].

САДРЖАЈ

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА	I
РЕЗИМЕ	II
SUMMARY	IV
НАЗИВ СЛИКЕ / NAME OF THE FIGURE	VI
НАЗИВ ТАБЕЛЕ / NAME OF THE TABLE	VIII
НОМЕНКЛАТУРА КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА	IX
1. УВОД	1
1.1. Опште поставке и начела у вези транспорта, разбијања и сепарације земљишне масе	1
1.2. Специфичности транспорта, разбијања и сепарације земљишне масе помоћу машина са осцилаторним платформама	2
1.3. Принципи функционисања осцилаторних платформи	7
2. РАДНИ УЧИНАК (ПРОИЗВОДНОСТ) ОСЦИЛАТОРНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПЛАТФОРМИ	7
2.1. Кинематски и динамички параметри који утичу на радни учинак осцилаторних транспортних платформи	7
2.2. Оптимални радни учинак осцилаторних транспортних платформи	13
2.3. Транспортивање земљишних наслага (слојева) и изолованих тела дуж решетке осцилаторне транспортне платформе	18
2.3.1. Транспортивање земљишних наслага (слојева)	18
2.3.2. Транспортивање изолованих тела	21
2.4. Фактори који утичу на финоћу сепарације земљишне масе помоћу осцилаторних транспортних платформи	22
3. МЕТОДОЛОШКИ ПРИСТУП И ТОК ИСТРАЖИВАЊА	24
3.1. Проблем истраживања	24
3.2. Степен истражености дефинисаног проблема и оправданост истраживања ...	26
3.3. Циљеви истраживања	29
3.4. Основне хипотезе истраживања	30
3.5. Експерименталне променљиве	30
3.5.1. Зависне променљиве	31
3.5.2. Независне променљиве	31
3.6. Поступци и технике за елаборацију прикупљених података и измерених резултата	32
3.7. План и ток истраживања	33

4. ДИНАМИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА СЕПАРАЦИЈЕ И ПРОСЕЈАВАЊА ВЛАЖНЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ НА ОСЦИЛАТОРНОЈ ТРАНСПОРТНОЈ ПЛАТФОРМИ	35
4.1. Математички модел (у функцији времена) процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе на осцилаторној транспортној платформи ...	35
4.2. Основне карактеристике система О-П-РП (окружење-платформа-радни параметри)	39
4.3. Анализа динамичког понашања осцилаторне транспортне платформе у току сепарације и просејавања влажне земљишне масе	43
4.3.1. Тестирање система О-П-РП помоћу одскочне $x_0(t)$ функције	44
4.3.2. Преносна функција система О-П-РП	47
4.3.3. Тестирање система О-П-РП помоћу методе фреквентног одзива ...	50
4.4. Стабилност осцилаторне транспортне платформе у току сепарације и просејавања влажне земљишне масе	56
4.4.1. Дефиниција стабилности система О-П-РП	56
4.4.2. Стабилност система О-П-РП према критеријуму Routh-a	60
4.4.3. Стабилност система О-П-РП према критеријуму Hurwitz-a	61
4.5. Резерва стабилности осцилаторне транспортне платформе у току сепарације и просејавања влажне земљишне масе	62
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОЦЕСА СЕПАРАЦИЈЕ И ПРОСЕЈАВАЊА ВЛАЖНЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ НА ОСЦИЛАТОРНОЈ ТРАНСПОРТНОЈ ПЛАТФОРМИ	64
5.1. Утицајни фактори, факторски нивои и план извођења експеримента	64
5.2. Експериментална осцилаторна транспортна платформа, услови и режими испитивања и резултати мерења	70
5.3. Регресиона анализа	71
5.4. Дисперзиона анализа	76
5.5. Декодирање математичког модела	79
6. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА	81
6.1. Резултати теоријских истраживања	81
6.2. Резултати експерименталних истраживања	84
6.2.1. Табеларни приказ резултата експерименталних истраживања	85
6.2.2. Графички приказ резултата експерименталних истраживања	87
7. ЗАКЉУЧЦИ ИСТРАЖИВАЊА	89
8. ПРЕДЛОЗИ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА	93

9. ПРИЛОЗИ	97
П1. Лапласове трансформације	97
П2. Међусобне релације побудних (тест) функција и њихових одзива	100
П3. Дијаграми за избор оптималних режима рада осцилаторних транспортних платформи (према [1])	101
П4. Дијаграми уравнотежења инерционих сила једноситих осцилаторних транспортних платформи (према [23])	102
П5. Листинг наредби у програмском пакету "MATLAB" за оптимизацију радних параметара утицајних на сепарацију и просејавање влажне земљишне масе помоћу осцилаторне транспортне платформе	103
ЛИТЕРАТУРА	104
РЕГИСТАР ИМЕНА	108
РЕГИСТАР ПОЈМОВА	108
ИЗЈАВЕ	

1. УВОД

1.1. ОПШТЕ ПОСТАВКЕ И НАЧЕЛА У ВЕЗИ ТРАНСПОРТА, РАЗБИЈАЊА И СЕПАРАЦИЈЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ

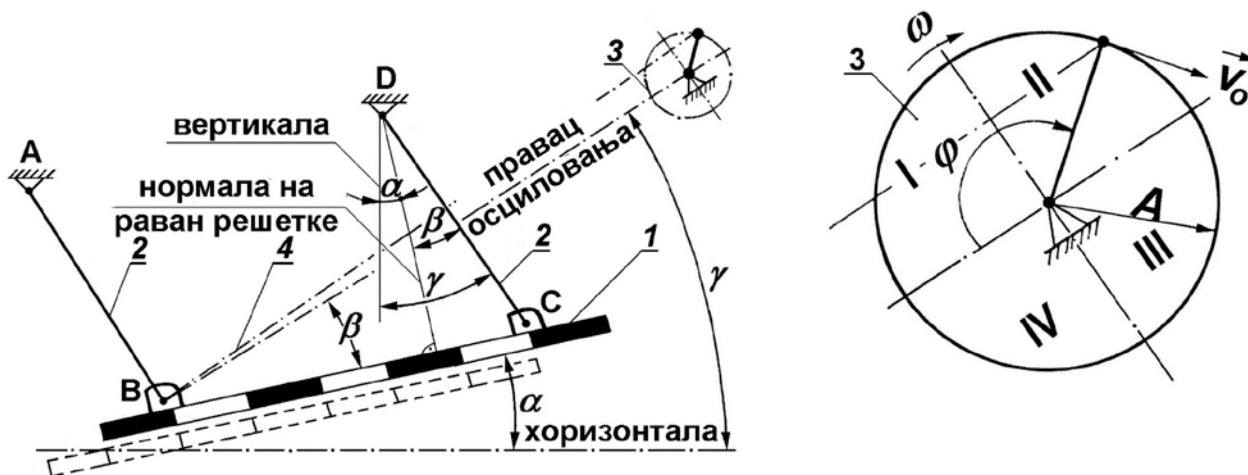
У свакодневном животу и у различитим областима технике као што су: процесна индустрија, пољопривредна механизација, грађевинарство, рударство и слично, сусрећу се различите машине и машински и технолошки системима којима се врши транспорт, односно разбијање и сепарација земљишне или некакве друге чврсте масе. Примера за ово има доста: у пољопривреди [11, 12] код многих жетелачких машина уз помоћ којих се из земље издвајају кртоласти плодови (кромпир, лук, репа, мрква); у грађевинарству [13] где се кроз специјална сита просејава песак за потребе нискоградње или високоградње, а такође и у рударству [14, 15] где се зависно од физичких и геолошких услова налазишта примењују различите методе експлоатације које у себи увек садрже споменуте процесе разбијања и сепарације транспортоване масе.

Споменути процеси најчешће се одвијају на машинама које се називају дробилнице (за грубо и средње уситњавање) и млинови (за фино уситњавање). Међутим, у новије време дошло се до сазнања да се споменути процеси разбијања и сепарације чврсте масе, поред већ споменутих метода, могу изводити на веома рационалан и успешан начин и коришћењем специјалних вибрационих осцилаторних платформи. На радни учинак ових платформи утиче много различитих фактора [16÷21]. Искуства стечена у експлоатацији у реалним радним условима показала су да највећи проблеми у раду конкретних машина и уређаја настају услед наглог повећања влажности, због појаве "лепљивости" транспортоване масе.

Да би се подручје примене споменутих платформи проширило и на екстремне радне услове, а имајући у виду чињеницу да је реч о једној релативно новој и непознатој проблематици, потребно је спровести обимна теоријска и практична истраживања у циљу добивања релевантних резултата неопходних за потпуније сагледавање споменутих процеса. Циљ је, наравно, да се добијени подаци и закључци искористе за пројектовање, конструисање и експлоатацију реалних машинских и технолошких система, на којима су уграђене овакве осцилаторне платформе.

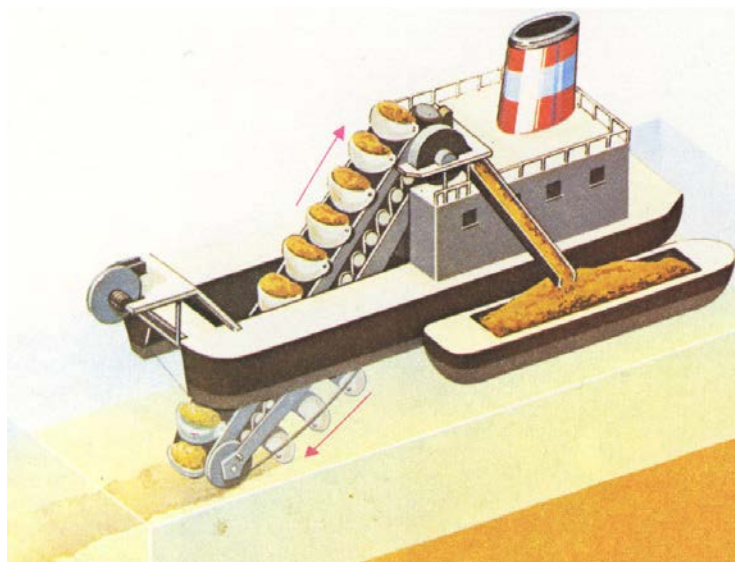
1.2. СПЕЦИФИЧНОСТИ ТРАНСПОРТА, РАЗБИЈАЊА И СЕПАРАЦИЈЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ ПОМОЋУ МАШИНА СА ОСЦИЛАТОРНИМ ПЛАТФОРМАМА

Општи изглед вибрационе осцилаторне платформе дат је на слици 1.



Сл. 1. Општа шема вибрационе осцилаторне платформе (1-платформа; 2-вешање; 3-ексцентар; 4-погонска полука; А-амплитуда осциловања платформе (полупречник ексцентра); φ -фаза осциловања платформе; α, β, γ -утицајни углови платформе; А, В, С, D-ослоне тачке платформе)

Земљишна или некаква друга чврста маса се поткопава помоћу раоника и затим набацује на платформу (1), или се пак директно (као што је на пример случај на сл. 2) из некаквог левка постављеног изнад платформе излучује на саму платформу, што зависи од врсте и конструкције конкретне платформске машине. На платформи се маса разбија услед динамичког удара о њу и пропада (просејава се) кроз решетку уграђену у самој платформи.



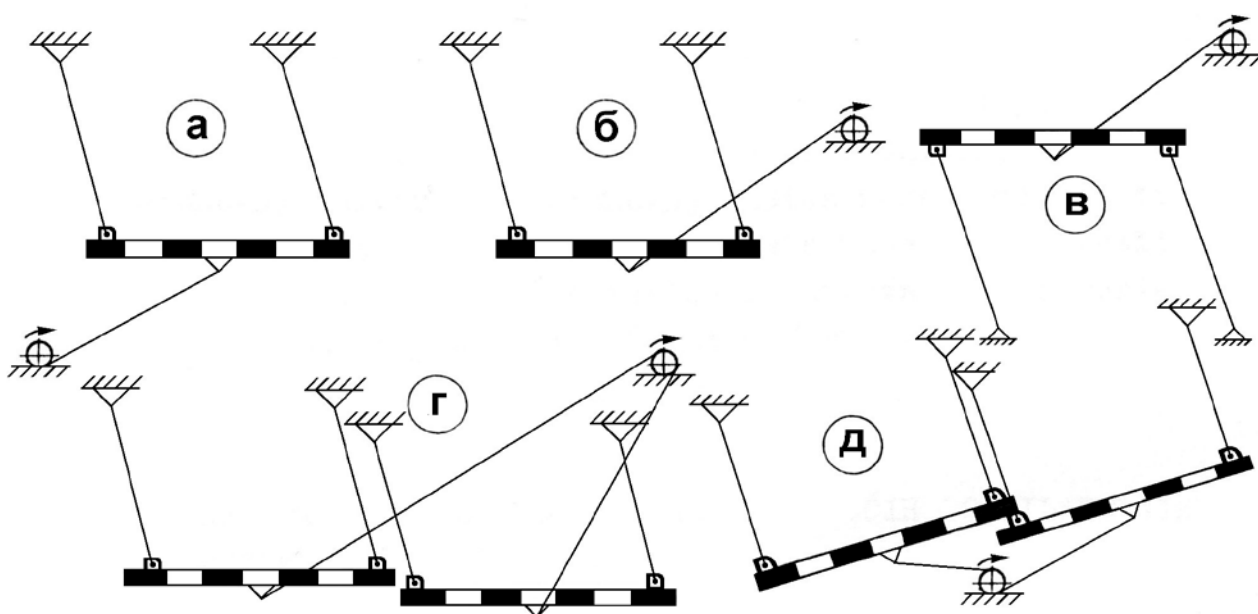
Сл. 2. Пример примене вибрационе осцилаторне платформе код технолошког система за сепарацију и просејавање песка из речног корита

Платформе се међусобно разликују према већем броју различитих критеријума. Најпре према броју сита (решетки), где се *разликују* једносите (једнорешеткасте) и двосите (дворешеткасте) платформе. Једносите вибрационе осцилаторне платформе најчешће се сусрећу у пракси и код њих су присутна висока динамичка оптерећења у раду проистекла услед дејства инерционих сила. За разлику од њих, двосите платформе раде са два сита истовремено, по правилу имају већи радни учинак (производност) од једноситих, а инерционе силе на ситима међусобно се поништавају (уравнотежавају) јер су убрзања на ситима увек усмерена у супротне стране. Стога, кад год је то могуће, предност у раду треба давати двоситим платформама, без обзира на њихову нешто сложенију конструкцију и вишу цену у односу на једносите платформе.

Платформе се такође разликују и по локацији, тј. месту на коме је смештено вратило ексцентра. Тако постоје платформе код којих је вратило ексцентра смештено испод решетке (сл. 3.а, 3.д) и платформе код којих је ексцентарско вратило смештено изнад решетке (сл. 3.б, 3.в, 3.г).

Најзад, постоји разлика и у начину вешања. Платформе могу бити са горњим начином вешања (сви случајеви на слици 3 осим случаја 3.в) и са доњим начином вешања (сл. 3.в). Имајући у виду целокупан технолошки процес, дошло се до закључка да је за праксу најприкладнија двосита (дворешеткаста) платформа код које је ексцентар избачен иза решетке онолико далеко колико је то максимално могуће (сл. 3.г). Иста таква платформа биће још боље уравнотежена уколико се ексцентар постави између сита (сл. 3.д).

Све побројане варијанте платформи шематски су приказане на слици 3.



Сл. 3. Разне врсте вибрационих осцилаторних платформи

Законитости равномерно променљивог кретања, када се довољно добро проуче, могу се аплицирати у пракси на платформе које се користе за транспорт чврсте масе како у пољопривреди тако и у рударству, грађевинарству и другим областима технике. Све платформске машине поседују низ специфичних особина:

1. Платформе морају обезбедити захтевану производност и при томе често на адекватан начин радити и при повишеним динамичким режимима (имају повишену учестаност-фреквенцију рада и значајну амплитуду осциловања).

2. Платформе морају максимално раздробити све слојеве (наслаге) чврсте масе, уз истовремену сепарацију појединих компонентних састојака из саме масе.

3. Платформе морају омогућити подизање - клизање материјала чврсте масе увис до свог горњег дела (сита) чак и онда када раде с већим нагибом решетке према хоризонтали, или понекад могу радити и с хоризонталним положајем решетке (без нагиба) ако је на адекватан начин обезбеђен дотур чврсте масе на решетку (на пример помоћу некаквог левка постављеног изнад саме решетке).

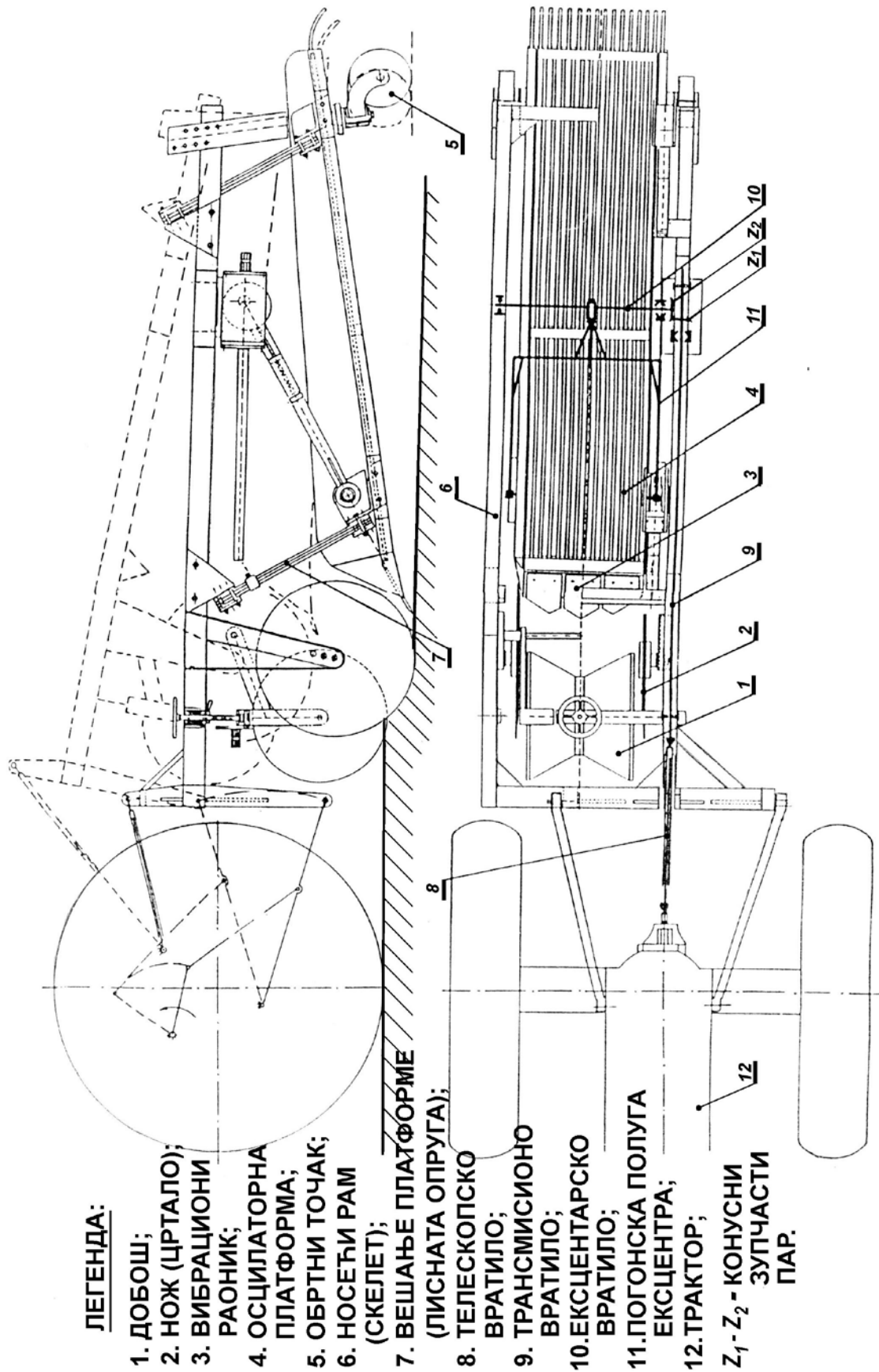
4. Зависно од сваког конкретног случаја примене платформе потребно је увек изнова вршити оптимизацију радних параметара од којих зависи рад платформе, како би њен радни учинак био максималан.

5. Све наведене особености доводе до тога да се радни параметри вибрационо осцилаторних платформских машина намењених за транспорт, разбијање и сепарацију чврсте масе знатно разликују од параметара сличних машина и направа које се примењују у другим сродним областима технике.

1.3. ПРИНЦИПИ ФУНКЦИОНИСАЊА ОСЦИЛАТОРНИХ ПЛАТФОРМИ

Као што је у досадашњем излагању већ истакнуто, вибрационе платформске машине могуће је користити у разним гранама и областима технике (пољопривреда, рударство, грађевинарство и слично). У пракси постоји доста различитих типова платформских машина и исте се међусобно разликују у низу конструкцијских детаља. Међутим, када су у питању разбијање и сепарација транспортоване масе, принцип њиховог рада истоветан је за све случајеве. То значи да се ови процеси могу изучавати на једном тачно и прецизно дефинисаном типу платформе, која би се затим у истоветној конструкцијској изведби могла применити на више различитих типова машина које обављају различите послове. Тиме је могуће извршити генерализацију добијених теоријских и практичних резултата истраживања, чиме би они постали релевантни и имали би велику употребну вредност код пројектовања сличних, или чак и нових машина и технолошких система који би у свом раду користили исте такве платформе.

Илустрације ради, у даљем тексту дат је шематски приказ (сл. 4) и кратак опис рада једне вибрационе платформске машине која се користи у пољопривреди као жетелачка машина за вађење кромпира, уз напомену да је рад платформског дела машине (позиција 4 на сл. 4) истоветан и код других типова платформских машина.



Сл. 4. Шематски приказ једносите вибрационе осцилаторне платформе примењене у пољопривреди [22]

Вадилица се прикључује на потезницу хидраулика трактора (12) који јој истовремено мора обезбедити потребну погонску снагу у опсегу $(5\div 10)kW$, а такође и смештај и подизање предњег дела вадилице, што се постиже прикључењем на излазно ожлебљено вратило трактора које преко система трансмисије даје погон осциловању, тј. вибрирању платформе. Трансмисија се у овом случају састоји од: телескопског карданског вратила (8) дужине 1 meter , трансмисионог вратила (9) које преко пара конусних зупчаника (z_1-z_2) преноси кретање на ексцентарско вратило (10), а ово даље на погонску полуку (11) која директно покреће платформу (4) напред-назад. Фреквенција осциловања платформе зависи од броја обртаја на излазном вратилу трактора и од преносног односа (z_2/z_1) конусног зупчастог пара и износи $f=10,8\text{ Hz}$ код спороходе варијанте ($n=540\text{ min}^{-1}$ на излазном вратилу трактора) или $f=20,7\text{ Hz}$ код брзоходе варијанте ($n=1000\text{ min}^{-1}$ на излазном вратилу трактора). Амплитуда осциловања (A) зависи од полупречника-радијуса ексцентарске криваје.

Регулација дубине поткопавања врши се окретањем навојног вретена на добошу–ваљку (1) који се обрће услед сопственог трења и који уједно гњечи зелену масу (врежу кромпира и траву). Ножевима–црталима (2), који се такође обрћу услед сопственог трења, врши се одвајање масе која се поткопава од околине, чиме се знатно олакшава процес сепарације (при томе се висина засецања ножева регулише премештањем осовинице ножа у нове отворе). Споме-нута чврста маса (земља са примесама и кртолама кромпира, врежа, трава и др.) поткопава се уз помоћ три раоника (3) путем високофреквентних вибрација, при чему врх раоника изводи сложено кретање. Раоници су чврсто везани са вибрационо-осцилаторном платформом (4), што значи да раоник и платформа изводе кретање тј. осциловање са истом фреквенцијом и са истом амплитудом (имају исту брзину осциловања).

Поткопану масу прихвата платформа (4) решеткастог типа на којој се остварује не само клизање чврсте масе уз платформу, већ и одбацавање масе по принципу косог хица на дужину од $(3\div 10)$ сантиметара. Тиме се веома успешно остварује и разбијање чврсте земљане масе, а знатан је и проток масе која пропада кроз решетку (сито) платформе. Остатак масе (кромпир, врежа и други чврсти остаци) падају иза платформе на земљу. Висина падања може се регулисати помоћу задњих обртних точкова (5) и обично износи $(20\div 30)$ сантиметара. Сама платформа поставља се на чврсту рамну конструкцију–скелет (6), а овешена је на четири лиснате опруге (7) чија се крутост може подешавати помоћу специјалног регулатора уграђеног директно на самим опругама. Акумулацијом потенцијалне енергије у овим опругама остварује се уравнотежење вибрационих маса које је веома битно за правилан рад платформе, као и за смањење потребне погонске снаге [23].

Вадилица оваквог типа обично се креће брзином од 1 до 2 metra/sekundi , што јој омогућује велики проток чврсте масе, уз малу брзину удара при паду кромпира на земљу, чиме се не оштећују површине кртола као код класичних добошастих вадилица. Вадилица има високу производност која према [22] износи од 0,3 до 0,6 $\text{hektara/po } \check{c}\text{asu}$, у зависности од састава и врсте земљишта. Суво земљиште из кога се вади кромпир уобичајено има чврстоћу $(1,7\div 3,2)MPa$, влажно земљиште са примесама глине-тешка иловача и до $10MPa$, док чврстоћа кртола кромпира износи $(0,5\div 0,8)MPa$. У укупној маси од $100kg$ ископане земље и вреже маса кромпира учествује са $(2\div 3)\%$, тј. износи $(2\div 3)kg$ код суве и неугрудване земље. Специфична конструкција омогућава вадилицу да се иста може успешно користити како у равничарским тако и у брдским пределима, при чему се једини проблеми у раду јављају код влажног земљишта са примесама глине и других лепљивих састојака.

2. РАДНИ УЧИНАК (ПРОИЗВОДНОСТ) ОСЦИЛАТОРНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПЛАТФОРМИ

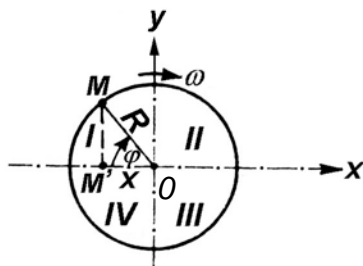
2.1. КИНЕМАТСКИ И ДИНАМИЧКИ ПАРАМЕТРИ КОЈИ УТИЧУ НА РАДНИ УЧИНАК ОСЦИЛАТОРНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПЛАТФОРМИ

Да би се могло отпочети са било каквом анализом параметара који утичу на рад осцилаторних платформи, потребно је најпре дефинисати све величине које карактеришу осцилаторно кретање платформи.

У техници су веома распрострањена кретања код којих се систем наизменично помера тамо-амо у односу на свој равнотежни положај, да би се после извесног временског периода поново вратио у тај исти положај. Тај се период назива периодом осциловања (T), а само кретање осцилаторним кретањем, док се за процесе који се понављају у истим временским интервалима каже да су периодични. Да би дошло до настанка осцилаторног кретања битан предуслов јесте постојање, тј. дејство силе и то релативне-еластичне силе, која у сваком моменту има смер супротан од смера кретања тела (слободне осцилације), или неке спољашње-поремећајне силе која одржава систем у стању осциловања (принудне осцилације). При деловању ових сила непрестано се врши трансформација енергије из једног облика у други (кинетичке у потенцијалну и обрнуто), па стога сила и енергија представљају динамичке величине које карактеришу осцилаторни систем. За разлику од њих кинематске величине карактеришу кретање са геометријског аспекта, а најзначајније од њих су:

- *период осциловања (T)* који је већ споменут, а представља време потребно за извршење једне пуне осцилације;
- *фреквенција-учестаност (f)* дефинише се као број осцилација у једној секунди: $f=1/T$, или $f=n/60$, уколико се иста исказује преко минутног броја обртаја n . Јединица за фреквенцију јесте *херц [Hz]*, тј. једна пуна осцилација у једној секунди;
- *кружна фреквенција (ω)* која са фреквенцијом f стоји у следећем односу: $\omega=2\pi\cdot f [s^{-1}]$, или: $\omega=2\pi/T [s^{-1}]$;
- *елонгација* је ма које (произвољно) удаљење од равнотежног положаја у посматраном временском тренутку;
- *амплитуда (A)* је максимално могућа елонгација, тј. максимално могуће удаљење од равнотежног положаја.

Да би се дефинисали брзина (v) и убрзање (a) при осцилаторном кретању, може се посматрати кретање материјалне тачке M по кружности полупречника R константном угаоном брзином ω и то у смеру кретања казаљке на сату (сл. 5).



O - равнотежни положај;
 M' - пројекција на x -осу тачке M ;
 $R=A$ - амплитуда осциловања;
 φ - фаза осциловања (одређује тренутно стање осциларног система): $\varphi=\omega t$.

Сл. 5. Кинематске карактеристике осцилаторног кретања материјалне тачке

Са слике 5 запажа се да пројекција M' на x -осу тачке M врши хармонијске осцилације око равнотежног положаја O , па се стога елонгација x може представити следећом једначином:

$$x = -R \cdot \cos \varphi = -A \cdot \cos \omega t \quad (2.1.1)$$

Сменом претходно дефинисаних релација у једначину за x добија се:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}(-A \cdot \cos \omega t) = \omega A \cdot \sin \omega t \quad (2.1.2)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(\omega A \cdot \sin \omega t) = \omega^2 A \cdot \cos \omega t \quad (2.1.3)$$

Брзина кретања при осциловању је, као што се из једначине (2.1.2) запажа, променљива величина и има екстремне вредности у случајевима:

- а) $v=v_{max}$ за $\sin \omega t=1$, односно при равнотежном положају;
- б) $v=v_{min}$ за $\sin \omega t=0$, односно при амплитудном положају.

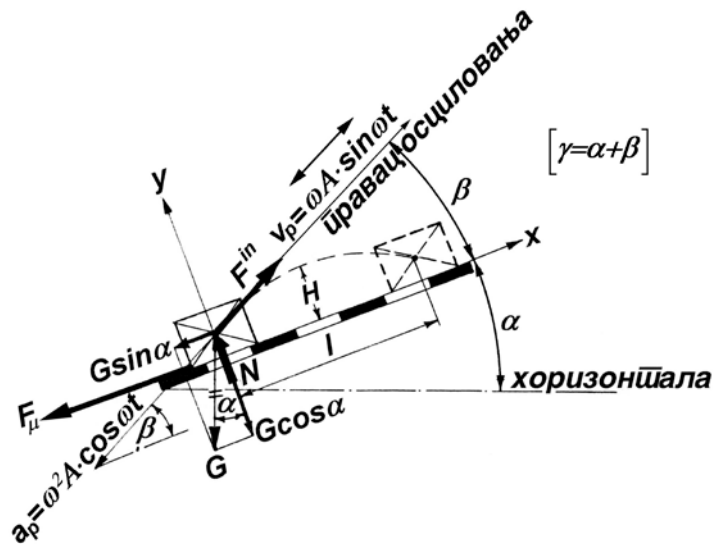
Пошто је брзина осциловања променљива величина ($v \neq const$) јавља се и убрзање, које према једначини (2.1.3) има екстремне вредности у случајевима:

- в) $a=a_{max}$ за $\cos \omega t=1$, тј. при амплитудном положају;
- г) $a=a_{min}$ за $\cos \omega t=0$, тј. при равнотежном положају.

Убрзање (a) је код осцилаторног кретања увек усмерено ка равнотежном положају, односно супротно од смера кретања (супротно од координате x). Услед тога ће се код осцилаторних платформи увек јављати снажна инерциона сила F^{in} која је усмерена супротно од смера убрзања платформе и коју је потребно на одговарајући начин уравнотежити. Међутим, иста та инерциона сила од велике је користи при раду платформе, јер у одређеном моменту (када убрзање постане довољно велико) иста делује на честице транспортоване масе и приморава их да клизе „навише” тј. уз платформу, у периоду у току кога је убрзање платформе усмерено „наниже”. При још већем убрзању (при још "оштријим" режимима осциловања) инерциона сила врши отргнуће честица од решетке платформе и приморава их на слободан лет у смеру транспортовања материјала и то према законитостима косог хица. На тај начин се транспортовање материјала (производност платформе) знатно увећавају.

На честицу (односно делић материјала) која се налази на решетки платформе (сл. 6) дејствују следеће силе:

- сила тежине ($G = m \cdot g$);
- нормална реакција тежине ($N = G \cdot \cos \alpha = m \cdot g \cdot \cos \alpha$);
- сила инерције ($|F^{in}| = m \cdot a_p = m \cdot \omega^2 \cdot A \cdot \cos \omega t$);
- сила трења ($F_{\mu} = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$).



Сл. 6. Анализа сила које делују на честицу при одбацивању материјала (l-даљина лета честица; H- максимална висина лета честица)

Убрзање решетке потребно да би наступило клизање земље увис (уз платформу) добија се пројекцијом на x-осу свих сила које делују на честицу:

$$\sum_{i=1}^n X_i = 0 \Rightarrow -G \cdot \sin \alpha - F_{\mu} + F^{in} \cdot \cos \beta = 0$$

$$F^{in} \cdot \cos \beta = F_{\mu} + G \cdot \sin \alpha$$

$$F^{in} = \frac{F_{\mu} + G \cdot \sin \alpha}{\cos \beta} = \frac{\mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot g \cdot \sin \alpha}{\cos \beta}$$

$$m \cdot a_p = m \cdot g \cdot \frac{\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos \beta} \quad / : m$$

$$a_p \geq g \cdot \frac{\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha}{\cos \beta} \geq g \cdot \frac{\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha}{\cos(\gamma - \alpha)} \quad (2.1.4)$$

Међутим, теоријске анализе и извршени експерименти* показали су да се знатно бољи ефекат сепарације масе и транспорта чврстог материјала могу постићи при режимима рада платформе при којима се материјал уместо клизањем увис („навише“) транспортује непрекидним поскакивањем, тј. одбацивањем честица чврсте масе од решетке по принципу косог хица. Рад платформе на таквим режимима омогућава веома добар транспорт (проток) материјала чак и при знатно већим угловима нагиба решетке према хоризонталу (угао α на слици 6).

* Огледе су у бившем СССР-у изводили И. И. Бленхајм и Г. Џенелидзе.

Да би се остварило поскакивање честица тј. одбацивање материјала од решетке, потребно је да истовремено буду испуњена следећа три услова:

1. Нормална компонента брзине решетке (платформе) v_{pn} мора бити усмерена навише (увис).

2. Нормална компонента убрзања решетке (платформе) a_{pn} мора бити усмерена наниже (на доле).

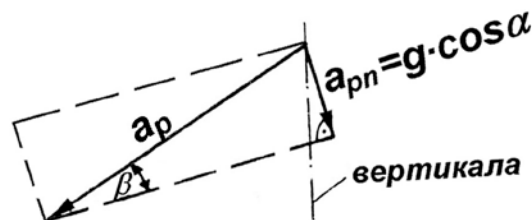
3. Апсолутна вредност нормалне компоненте убрзања решетке $|a_{pn}|$ мора бити једнака или већа од нормалне компоненте убрзања слободног падања: $|a_{pn}| \geq g \cdot \cos \alpha$.

Имајући у виду претходна три услова и посматрајући поново слику 1 и слику 6, долази се до закључка да је одбацивање честица земље од платформе могуће само у II квадранту, када убрзање решетке износи (сл. 7):

$$\sin \beta = \frac{a_{pn}}{a_p} \Rightarrow a_p = \frac{a_{pn}}{\sin \beta} = \frac{g \cdot \cos \alpha}{\sin \beta}$$

$$[a_p = \omega^2 \cdot A \cdot \cos \omega t, \text{ према (2.1.3) }]$$

$$(a_p = \omega^2 \cdot A \cdot \cos \omega t) \geq \frac{g \cdot \cos \alpha}{\sin \beta} \quad (2.1.5)$$

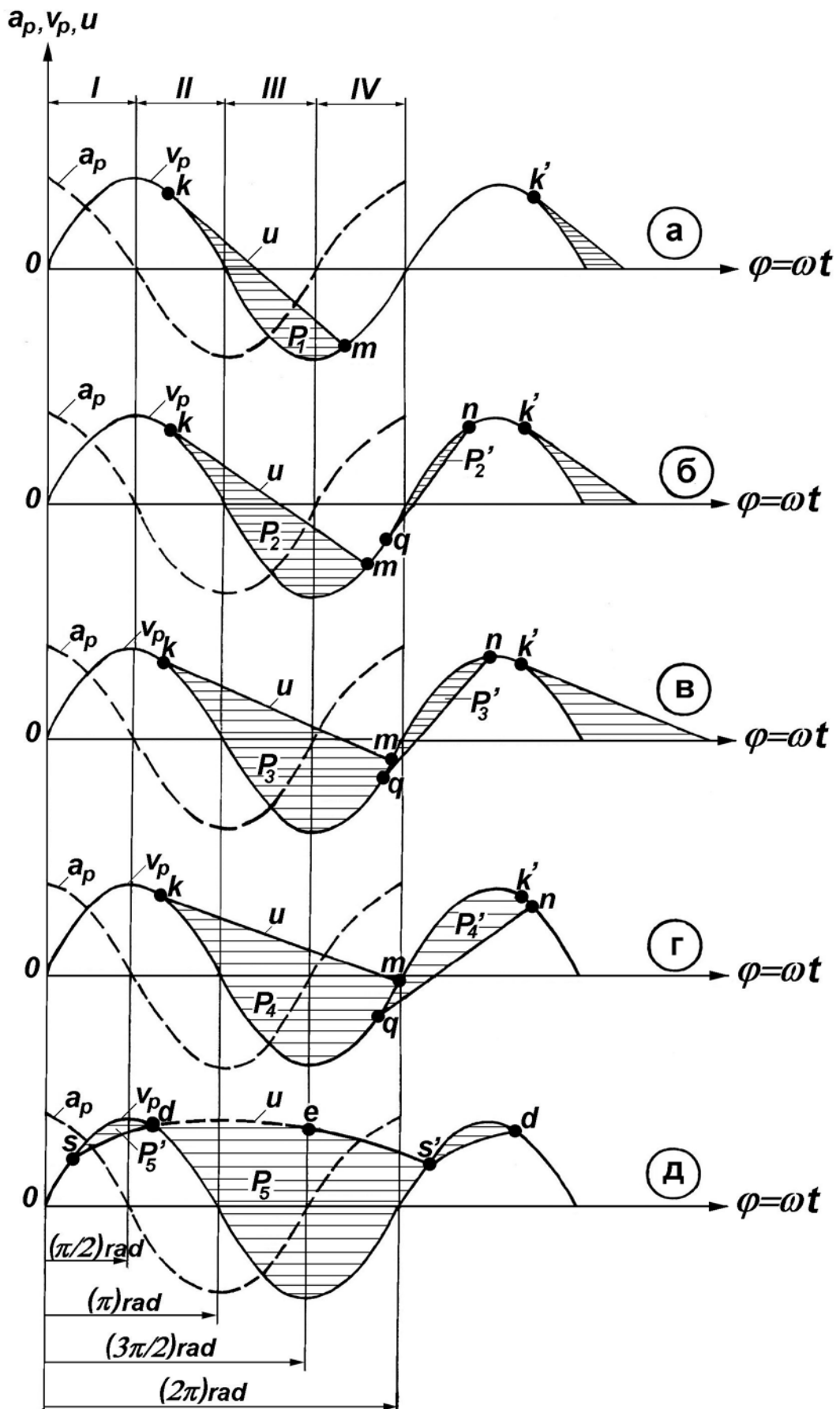


Сл. 7. Убрзања решетке (платформе) при режиму рада са одбацивањем материјала

Посматрајући поново једначине (2.1.2) и (2.1.3) уочава се да се брзина решетки тј. платформе v_p мења по синусном закону, а убрзање платформе a_p мења се по косинусном закону, па се стога величине v_p и a_p могу графички приказати на дијаграму помоћу синусоиде односно косинусоиде. Ако се на апсцисну осу таквих кинематских дијаграма нанесе протекло време t (или уместо времена њему пропорционална величина φ тј. угао обртања ексцентри), могу се добити график брзине, односно график убрзања платформе.

За случај када је $\alpha=0$ (нема нагиба платформе према хоризонталу), руски теоретичари В. А. Олевскиј и Н. А. Корпенко [24] разликују пет основних режима рада вибрационе осцилаторне платформе (сл. 8):

- 1) спороходни режим без супротног клизања материјала;
- 2) полубрзоходни режим са две паузе;
- 3) полубрзоходни режим са једном паузом;
- 4) брзоходни режим без паузе;
- 5) режим рада са одбацивањем материјала.



Сл. 8. Кинематски дијаграми платформе по В. А. Олевском (a_p -убрзање платформе; v_p -брзина платформе; u -брзина земљаних честица; I, II, III, IV-квадранти)

а) При *спороходном режиму рада* (сл. 8.а) брзина решетке платформе v_p и брзина честице u међусобно се подударјају све до тачке „ k ” (II квадрант) тј. честица путује на платформи брзином платформе v_p , а након тога (у тачки „ k ”) негативно убрзање решетке платформе a_p постаје толико велико да сила инерције F^n надвладава силу трења честице о платформу F_μ , па честица почиње да клиза уз платформу (јер је $F^n > F_\mu$). Ово клизање одиграва се у страну предавања материјала и то само једанпут у току једног пуног обрта ексцентра. Клизање у супротну страну тј. надоле не постоји. Пређени пут честице у току клизања навише односно транспортовани материјал Q_{t1} за време једног пуног обрта ексцентра, графички је приказан на дијаграму шрафираном површином P_1 - важи: $Q_{t1} = P_1$.

б) Повећањем фреквенције осциловања долази се до *полубрзоходног режима рада с двема паузама* и то између тачака: $m \div q$ и $n \div k'$ (сл. 8.б). При овом режиму честица клиже како напред (између тачака $k \div m$) тако и назад (између тачака $q \div n$). Напред тј. уз платформу транспортује се количина материјала P_2 , а уназад тј. низ платформу количина материјала P_2' , па је стварна количина транспортованог материјала од стране платформе одређена разликом површина P_2 и P_2' , тј.: $Q_{t2} = P_2 - P_2'$.

в) Ако се и даље повећава фреквенција осциловања, платформа прелази на *полубрзоходни режим рада са једном паузом* и то између тачака $n \div k'$. Транспортована количина материјала тада износи: $Q_{t3} = P_3 - P_3'$ (сл. 8.в).

г) При још већем увећању фреквенције осциловања (сл. 8.г) наступа *брзоходни режим рада без икакве паузе* у транспортовању материјала, тј. овде се престано предаје количина материјала: $Q_{t4} = P_4 - P_4'$.

д) Најзад, настави ли се и даље са увећавањем фреквенције тј. обимне брзине, могуће је привидно зауставити рад платформе, при чему наступа *режим рада са одбацивањем материјала* (сл. 8.д). При овом режиму још на самом почетку циклуса (тачка „ s ” у I квадранту) наступа клизање материјала наниже све до тачке „ d ” (у II квадранту) када честица у погледу свог убрзања испуњава услов за одбацивање дат једначином (2.1.5) и тада се честица одваја од површине платформе и креће се даље као тело избачено под углом γ према хоризонту (као коси хитац). Тада је предавање материјала (површина P_5 на дијаграму) далеко највеће, а транспорт у супротну страну (површина P_5') релативно мали, па је стварни транспортовани материјал врло велики: $Q_{t5} = P_5 - P_5'$.

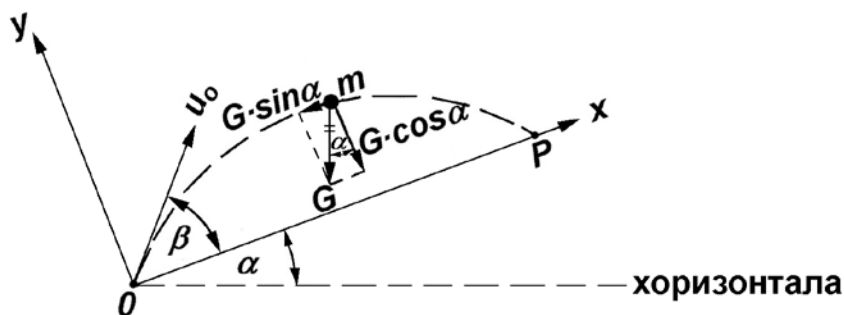
Уопште узев, за количине транспортованог материјала при појединим режимима рада платформе, важи релација:

$$Q_{t5} > Q_{t4} > Q_{t3} > Q_{t2} > Q_{t1} \quad (2.1.6)$$

При даљим повећањима амплитуда или фреквенција осциловања, теоретски би се могли достићи такви режими рада платформе при којима би време лета честица било једнако временима: једнога, два, три, ..., итд. обртаја ексцентарске криваје. На тај би се начин омогућило потпуно разбијање чврсте масе, а знатно би се повећао и ефекат сепарације. Управо при таквим „оштрим” динамичким режимима платформе морају заснивати свој рад у реалним експлоатационим условима.

2.2. ОПТИМАЛНИ РАДНИ УЧИНАК ОСЦИЛАТОРНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПЛАТФОРМИ

Да би се саставиле диференцијалне једначине кретања честица при слободном лету, потребно је увести претпоставку да се кретање истих у потпуности одвија по законитостима кретања које важе за коси хитац, сматрајући честицу за материјалну тачку масе m и занемарујући при том отпор ваздуха. Координатни почетак узима се у тачки „0“ која представља почетни положај материјалне тачке ($t=0$), оса O_y биће усмерена вертикално навише тј. нормално на раван платформе, а оса O_x у смеру лета честице (у смеру транспортовања материјала), сходно слици 9.



Сл. 9. Одбацивање честице од платформе (коси хитац)

Покретна материјална тачка масе m налази се било где на путањи (у произвољном положају) и на њу тада делује само сила тежине G , а дејство свих осталих сила не узима се у обзир јер су све оне деловале до тренутка $t=0$, када су материјалној тачки саопштите некакву почетну брзину u_0 , којом се замењује њихово дејство на материјалну тачку. У том случају, пројектовањем свих сила на x и y осу, добија се:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m \ddot{x} = \sum X_i = -G \cdot \sin \alpha \quad / : m$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = m \ddot{y} = \sum Y_i = -G \cdot \cos \alpha \quad / : m$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \ddot{x} = -g \cdot \sin \alpha \quad (2.2.1)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \ddot{y} = -g \cdot \cos \alpha \quad (2.2.1')$$

За почетне услове кретања при: $t=0$, $x=0$, $y=0$, узима се:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = u_0 \cdot \cos \beta$$

$$\frac{dy}{dt} = \dot{y} = u_0 \cdot \sin \beta$$

Интеграцијом једначина (2.2.1) и (2.2.1') по времену добија се:

$$\int \frac{d^2x}{dt^2} = \int -g \cdot \sin \alpha dt \Rightarrow \frac{dx}{dt} = -g \cdot t \cdot \sin \alpha + C_1 \quad (2.2.2)$$

$$\int \frac{d^2y}{dt^2} = \int -g \cdot \cos \alpha dt \Rightarrow \frac{dy}{dt} = -g \cdot t \cdot \cos \alpha + C_2 \quad (2.2.2')$$

Интеграционе константе C_1 и C_2 одређују се из почетних услова кретања:

$$u_o \cdot \cos \beta = -g \cdot 0 \cdot \sin \alpha + C_1 \Rightarrow C_1 = u_o \cdot \cos \beta \quad (2.2.3)$$

$$u_o \cdot \sin \beta = -g \cdot 0 \cdot \cos \alpha + C_2 \Rightarrow C_2 = u_o \cdot \sin \beta \quad (2.2.3')$$

Сменом нађених вредности за C_1 и C_2 у једначине (2.2.2) и (2.2.2') добија се:

$$\frac{dx}{dt} = -g \cdot t \cdot \sin \alpha + u_o \cdot \cos \beta \quad (2.2.4)$$

$$\frac{dy}{dt} = -g \cdot t \cdot \cos \alpha + u_o \cdot \sin \beta \quad (2.2.4')$$

Интеграцијом система једначина (2.2.4) и (2.2.4') долази се до параметарских једначина кретања честица:

$$\int \frac{dx}{dt} = (-\int g \cdot t \cdot \sin \alpha + \int u_o \cdot \cos \beta) dt$$

$$\int \frac{dy}{dt} = (-\int g \cdot t \cdot \cos \alpha + \int u_o \cdot \sin \beta) dt$$

$$x = -g \cdot \sin \alpha \cdot \frac{t^2}{2} + u_o \cdot \cos \beta \cdot t + C_3 \Rightarrow x = u_o \cdot \cos \beta \cdot t - \frac{gt^2}{2} \cdot \sin \alpha + C_3 \quad (2.2.5)$$

$$y = -g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{t^2}{2} + u_o \cdot \sin \beta \cdot t + C_4 \Rightarrow y = u_o \cdot \sin \beta \cdot t - \frac{gt^2}{2} \cdot \cos \alpha + C_4 \quad (2.2.5')$$

Интеграционе константе C_3 и C_4 одређују се из почетних услова кретања:

$$0 = u_o \cdot \cos \beta \cdot 0 - \frac{g \cdot 0^2}{2} \cdot \sin \alpha + C_3 \Rightarrow C_3 = 0$$

$$0 = u_o \cdot \sin \beta \cdot 0 - \frac{g \cdot 0^2}{2} \cdot \cos \alpha + C_4 \Rightarrow C_4 = 0$$

Време лета честица одређује се тако што се ордината (y) у (2.2.5') изједначује са нулом, јер је у том тренутку честица већ пала на решетку (у тачку P на слици 9):

$$y = u_o \cdot \sin \beta \cdot t - \frac{gt^2}{2} \cdot \cos \alpha + 0 = 0 \quad / : t$$

$$u_o \cdot \sin \beta = \frac{gt}{2} \cdot \cos \alpha$$

$$t = \frac{2 \cdot u_o \cdot \sin \beta}{g \cdot \cos \alpha} \quad (2.2.6)$$

Да би се обезбедио континуитет (непрекидност) платформе у одбацивању честица, горње време мора бити једнако времену за које се изврши један пуни обртај ексцентарског вратила:

$$\frac{2 \cdot u_o \cdot \sin \beta}{g \cdot \cos \alpha} = \frac{2\pi}{\omega} \Rightarrow u_o = \frac{\pi \cdot g \cdot \cos \alpha}{\omega \cdot \sin \beta} \quad (2.2.7)$$

Почетна брзина u_o честице може се изразити и на други начин, преко осцилаторне брзине платформе:

$$u_o = \omega \cdot A \cdot \sin \omega t_o \quad (2.2.8)$$

Једначине (2.2.7) и (2.2.8) имају једнаке леве стране, па им се стога смеју изједначити и десне стране:

$$\frac{\pi \cdot g \cdot \cos \alpha}{\omega \cdot \sin \beta} = \omega \cdot A \cdot \sin \omega t_o \Rightarrow \sin \omega t_o = \frac{\pi \cdot g \cdot \cos \alpha}{\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta} \quad (2.2.9)$$

$\omega t_o \rightarrow$ "угао отргнућа честица" при коме се обезбеђује критични режим рада са одбацивањем материјала.

Ако се једначина (2.1.5) која представља потребно убрзање платформе да би наступило одбацивање честица реши по $\cos \omega t$, добија се:

$$\omega^2 \cdot A \cdot \cos \omega t = \frac{g \cdot \cos \alpha}{\sin \beta} \Rightarrow \cos \omega t = \frac{g \cdot \cos \alpha}{\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta}$$

Ако се даље тражи "угао отргнућа честица" добија се:

$$\cos \omega t_o = \frac{g \cdot \cos \alpha}{\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta} \quad (2.2.10)$$

Применом основне тригонометријске идентичности: $\sin^2 \omega t_o + \cos^2 \omega t_o = 1$, произлази следећа релација:

$$\cos^2 \omega t_o = 1 - \sin^2 \omega t_o$$

$$\cos \omega t_o = \sqrt{1 - \sin^2 \omega t_o} \quad (2.2.10')$$

Изједначавањем десних страна у (2.2.10) и (2.2.10') добија се:

$$\frac{g \cdot \cos \alpha}{\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta} = \sqrt{1 - \sin^2 \omega t_0}$$

$$\left(\frac{g \cdot \cos \alpha}{\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta} \right)^2 = 1 - \sin^2 \omega t_0$$

$$\sin \omega t_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{g \cdot \cos \alpha}{\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta} \right)^2} \quad (2.2.11)$$

Сменом нађене вредности за $\sin \omega t_0$ из (2.2.11) у (2.2.9), следи следећа једнакост:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{g \cdot \cos \alpha}{\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta} \right)^2} = \frac{\pi \cdot g \cdot \cos \alpha}{\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta}$$

$$\sqrt{\frac{(\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta)^2 - (g \cdot \cos \alpha)^2}{(\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta)^2}} = \frac{\pi \cdot g \cdot \cos \alpha}{\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta}$$

$$\sqrt{(\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta)^2 - (g \cdot \cos \alpha)^2} = \pi \cdot g \cdot \cos \alpha$$

$$(\omega^2 \cdot A \cdot \sin \beta)^2 - (g \cdot \cos \alpha)^2 - (\pi \cdot g \cdot \cos \alpha)^2 = 0$$

$$(\omega^2 \cdot A)^2 \sin^2 \beta = (\pi \cdot g \cdot \cos \alpha)^2 + (g \cdot \cos \alpha)^2 = g^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot (\pi^2 + 1)$$

$$(\omega^2 \cdot A)^2 = \frac{g^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot (\pi^2 + 1)}{\sin^2 \beta}$$

$$\omega^2 \cdot A = \frac{g \cdot \cos \alpha}{\sin \beta} \sqrt{\pi^2 + 1} \quad [\sqrt{\pi^2 + 1} \approx 3,3]$$

$$(\omega^2 \cdot A)_I = 3,3 \frac{g \cdot \cos \alpha}{\sin \beta} \quad (2.2.12)$$

Ако би био задат услов да време лета честица у (2.2.6) буде једнако времену потребном за два пуна обртаја ексцентарског вратила, у том случају би било:

$$t_{II} = \frac{2 \cdot u_0 \cdot \sin \beta}{g \cdot \cos \alpha} = \frac{4\pi}{\omega}$$

По аналогији, за три пуна обртаја ексцентарског вратила:

$$t_{III} = \frac{2 \cdot u_0 \cdot \sin \beta}{g \cdot \cos \alpha} = \frac{6\pi}{\omega}, \dots, \text{ итд.}$$

Тада би се низом идентичних математичких трансформација добиле следеће вредности за "углове отргнућа честица":

$$\left(\omega^2 \cdot A\right)_{II} = 6,36 \frac{g \cdot \cos \alpha}{\sin \beta}$$

$$\left(\omega^2 \cdot A\right)_{III} = 9,47 \frac{g \cdot \cos \alpha}{\sin \beta}$$

.....
Аналогно, за n обртаја ексцентарског вратила било би:

$$\left(\omega^2 \cdot A\right)_n = N \frac{g \cdot \cos \alpha}{\sin \beta} \quad (2.2.13)$$

Сменом у (2.2.13) познатог израза за кружну угаону брзину: $\omega = 2\pi n/60 = \pi n/30$ [s^{-1}], коначно се добија тзв. "критични број обртаја" n_{kr} потребан за отпочињање режима рада платформе са одбацивањем материјала:

$$\frac{\pi^2 \cdot n_{kr}^2}{30^2} A = N \frac{g \cdot \cos \alpha}{\sin \beta} \Rightarrow \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot n_{kr}^2}{30^2}} = \sqrt{\frac{N \cdot g \cdot \cos \alpha}{A \cdot \sin \beta}} \Rightarrow$$

$$n_{kr} \frac{\pi}{30} = \sqrt{\frac{N \cdot g \cdot \cos \alpha}{A \cdot \sin \beta}} \Rightarrow n_{kr} = \frac{30\sqrt{g}}{\pi} \sqrt{\frac{N \cdot \cos \alpha}{A \cdot \sin \beta}}$$

Како је: $\frac{30\sqrt{g}}{\pi} \approx 30$, биће:

$$n_{kr} = 30 \sqrt{\frac{N \cdot \cos \alpha}{A \cdot \sin \beta}} \quad (2.2.14)$$

Пошто је оптимални режим рада осцилаторне платформе онај режим при коме се остварује транспорт материјала непрекидним одбацивањем честица чврсте масе по принципу косог хица, то произлази да је критични број обртаја n_{kr} уједно и оптимални број обртаја платформе n_{opt} , па се тако коначно може писати:

$$n_{opt} = 30 \sqrt{\frac{N \cdot \cos \alpha}{A \cdot \sin \beta}} \quad (2.2.14')$$

При том коефицијент N има следеће вредности:

$N = 3,3; 6,36; 9,47; 12,6; 15,7; 18,9; \dots$; итд.

На основу свега што је претходно истакнуто може се коначно закључити да је *оптимални број обртаја платформе* функција од три величине и то:

- амплитуде осциловања (A);
- угла нагиба решетке према хоризонталаи (α);
- угла транспорта платформе (β).

Стога се може писати да је: $n_{opt} = f(A; \alpha; \beta)$ (2.2.14'')

2.3. ТРАНСПОРТОВАЊЕ ЗЕМЉИШНИХ НАСЛАГА (СЛОЈЕВА) И ИЗОЛОВАНИХ ТЕЛА ДУЖ РЕШЕТКЕ ОСЦИЛАТОРНЕ ТРАНСПОРТНЕ ПЛАТФОРМЕ

Да би се установио начин и механизам транспорта земљишне масе помоћу вибрационих осцилаторних платформи, вршени су знатни експерименти и практична истраживања и то како у лабораторијским условима (уз помоћ специјално направљеног земљишног канала), тако и у реалним-експлоатационим условима у којима платформа ради у стварности. При томе су коришћене разне истраживачке методе и поступци, а најреалнији резултати добијени су проучавањем кретања чврсте масе уз помоћ тзв. "брзинских фото-снимака"-кинограма. На основу касније анализе великог броја ових снимака дошло се до закључка да на способност платформе за транспорт земљишне масе знатно утиче карактер оптерећења, односно врста оптерећења платформе. Најповољнији услови за транспорт наступају онда када на платформу пристиже земљишна маса у виду вишеслојних наслага, а најнеповољнији када на платформу долазе засебна тј. изолована тела, односно земљишно грумење помешано са каменчићима.

Стога је не редак случај да једна иста платформа која добро транспортује и сепарира масу која пристиже у виду наслага, при потпуно истим кинематским условима и радним параметрима, не обезбеђује нормалан транспорт засебних изолованих тела и грудви услед њиховог скотрљавања. Због наведеног разлога потребно је да се посебно размотре и један и други случај транспортовања чврсте масе.

2.3.1. Транспортовање земљишних наслага (слојева)

Да би се дошло до опипљивих резултата при овим разматрањима, уводи се средња брзина померања слојева земље по решетки v_{sr} , којом се на неки начин карактерише интензитет померања земљане масе у току времена. Као што је у претходној тачки 2.2. већ речено, најбољи ефекат транспорта остварује се онда када се достигну режими рада са одбацивањем материјала. Посматрајући формулу (2.2.14') види се да у њој фигуришу четири величине: n , A , α , β . У даљем излагању разматра се укратко како свака од њих утиче на транспорт земљишних наслага.

• број обртаја вратила ексцента (n) јесте један од најутицајнијих фактора, а као што се из (2.2.14') може уочити исти је функција од величина: A , α , β , што значи да се он може прописати тек пошто се претходно усвоје величине A , α , и β . Број обртаја n или њему еквивалентна величина ω такође зависе и од вредности коефицијента N , који опет зависи од тога да ли је време лета честица приликом косог хица једнако времену: једнога, два, три, ... , или више пуних обрта ексцентарског вратила.

• *амплитуда* (A) у тесној је вези с бројем обртаја n односно ω , јер производ величина ω и A даје брзину осциловања (ωA), јер је: $[\omega \cdot A = \frac{l}{s} \cdot m = \frac{m}{s}]$, што је јединица за брзину у међународном SI систему јединица и мера. Стога се у пракси уместо изолованог посматрања величина ω и A знатно чешће посматра њихово заједничко деловање на осцилаторни систем преко брзине осциловања ωA , или преко убрзања осциловања ($\omega^2 A$), где такође важи: $[\omega^2 \cdot A = \frac{l}{s^2} \cdot m = \frac{m}{s^2}]$, што представља јединицу за убрзање у међународном SI систему јединица и мера. Препоручене вредности амплитуда осциловања крећу се у границама $A=(15\div 25)mm$ и то:

- за платформе које се користе на почетку технолошког процеса (поткопавају наслагe у дебљем слоју) препоручује се: $A=(20\div 25)mm$;
- за платформе које се користе на средини технолошког процеса (средња дебљина слојева): $A=20mm$;
- за платформе које се користе на крају технолошког процеса (танке наслагe) препоручују се амплитуде: $A=(15\div 20)mm$.

• *угао нагиба решетке према хоризонтали* (α) делује тако што се са његовим увећањем сходно формули (2.1.5) смањује потребно убрзање решетке за наступање режима рада са одбацивањем материјала, а његове препоручене вредности налазе се у опсегу $\alpha=10^\circ\div 30^\circ$ и то:

- за раоник фиксиран за решетку платформе: до 30° ;
- за раоник смештен изван решетке платформе: до 20° ;
- за другу решетку (код двоситих платформи): до 15° ;
- за платформе које раде на средини или на крају технолошког процеса: до 10° .

• *угао транспорта платформе* (β) дефинише правац осциловања посматран у односу на раван решетке, а његово повећање сходно формули (2.1.5) изазива смањење убрзања решетке неопходног за одбацивање материјала. Да би транспорт материјала био ефикасан, овај угао треба да буде у опсегу $\beta=15^\circ\div 25^\circ$:

- за платформе које се користе на почетку технолошког процеса: $\beta=15^\circ\div 20^\circ$;
- за платформе које се користе на средини или на крају технолошког процеса: $\beta=20^\circ\div 25^\circ$.

Поред наведених параметара: n , A , α , β , који непосредно проистичу из формуле (2.2.14') огледи су показали да брзина транспортовања земље дуж решетке знатно зависи од још два важна фактора:

- висине дотурених слојева чврсте масе који пристижу на платформу (h);
- влажности земље (w).

- висина слојева земљишне масе који се дотурају на платформу (h) утиче на рад платформе на следећи начин: убрзање решетке се не предаје сваком слоју наслага истовремено већ поступно, идући од доњих слојева наслага ка горњим слојевима, пригушујући се са увећањем дебљине слоја. То значи да се честице из доњих слојева наслага, које су у непосреднијем контакту са решетком, крећу брже због добијеног већег убрзања у односу на честице које се налазе у горњим-вршним слојевима. То опет значи да за време рада платформе нижи слојеви материјала предају своју кинетичку енергију слојевима материјала који су изнад њих и при томе начине кретање наниже, док за то исто време горњи слојеви настављају да се померају навише, па тако настаје раскидање-цепање слојева материјала. Као резултат тога горњи и доњи слојеви почињу да се крећу у сусрет једни другима, што проузрокује сударање честица из различитих слојева, што такође доприноси дробљењу и разбијању чврсте масе. При овоме су разлике у брзинама померања виших и нижих слојева утолико веће уколико су слојеви наслага дебљи.

- И на крају, огледи су показали да транспортовање чврсте масе знатно зависи од *влажности земље* (w), при чему се најбољи ефекат транспорта и сепарације добија при раду са сувом и меком земљом без присуства чврстих грудви, док се са повећањем влажности споменути ефекат знатно смањује. Код тзв. "тешке иловаче", односно влажне и пластичне земље са примесам глине, ефекат транспорта и сепарације је далеко најслабији, због лепљења глине за раоник који је у том случају веома тешко подкопава.

Као резултат свих споменутих огледа и детаљних анализа брзинских фотоснимача настала је следећа емпиријска формула, којом се може приближно израчунати *средња брзина померања слојева (наслага) земљишне масе* по платформи:

$$v_{sr} = 0,1 \cdot k_w \cdot k_h \cdot n \cdot A \quad [m/s] \quad (2.3.1)$$

У формули (2.3.1) фигуришу два коефицијента:

k_w - коефицијент влажности земље ($k_w \approx 1$ при раду са сувом земљом, односно $k_w \approx 0,6 \div 0,7$ при раду са влажном-пластичном земљом);

k_h - коефицијент товарења, тј. дебљине земљишног слоја дотуреног на платформу (овај коефицијент зависи од h , тј: $k_h = f(h)$), па важе препоруке:

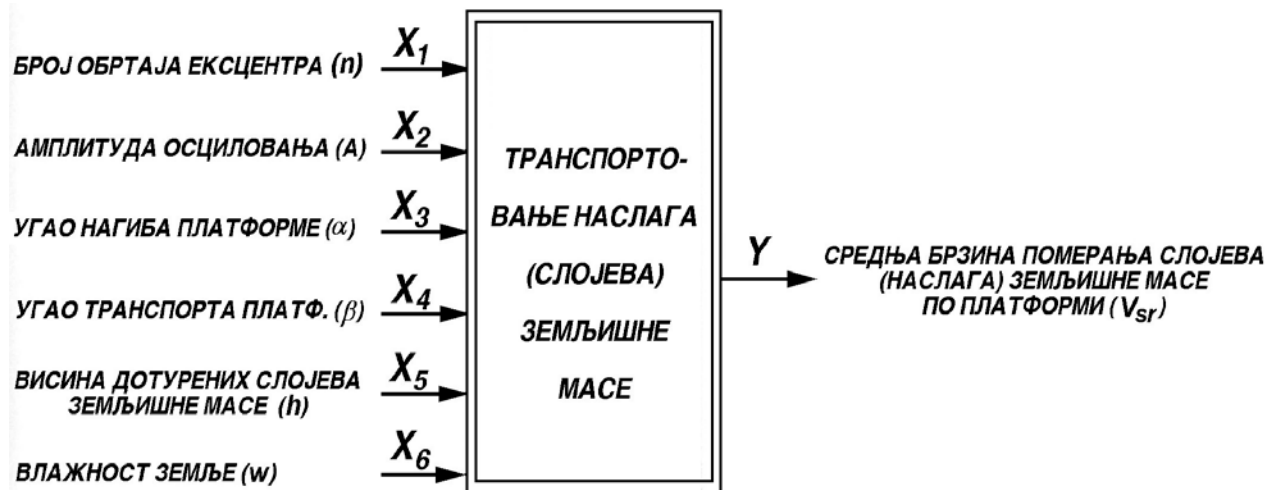
→ ако је $h < 50mm$ → $k_h = 1$;

→ ако је $h = (50 \div 100)mm$ → $k_h = 0,8$;

→ ако је $h = (100 \div 150)mm$ → $k_h = 0,6$;

→ ако је $h > 150mm$ → пракса је показала да наступа преоптерећење платформе наслагом и као последица тога самостојивање масе.

Прегледности ради, сви побројани фактори који утичу на транспортовање наслага (слојева) земљишне масе приказани су на слици 10.



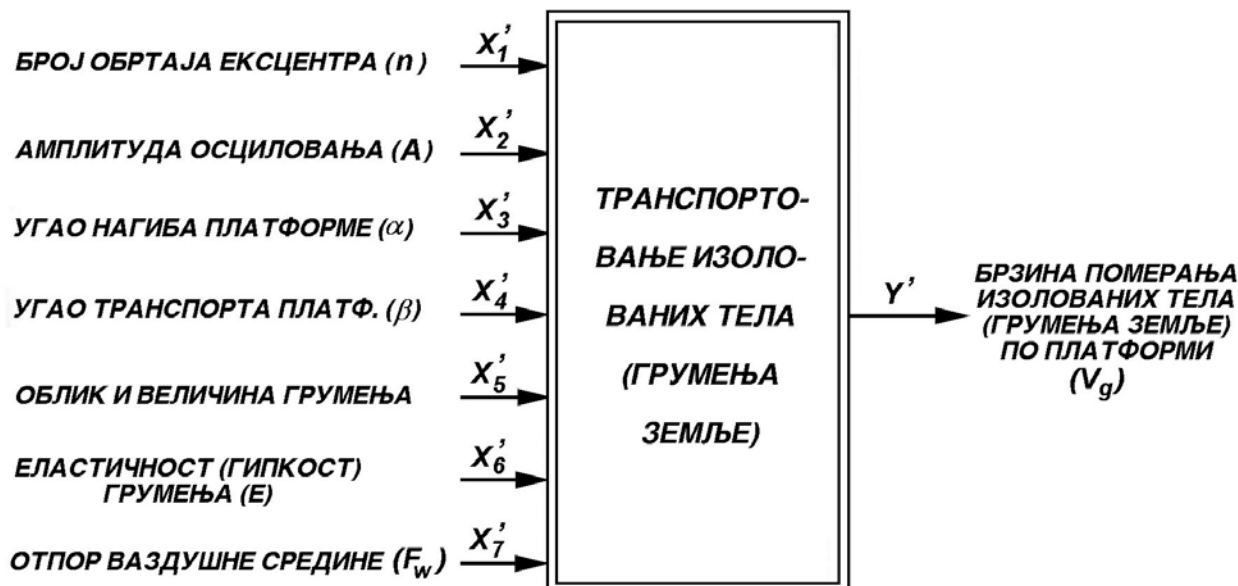
Сл. 10. Блок шема утицајних фактора на транспортовање наслага (слојева) земљишне масе дуж решетке осцилаторне платформе

2.3.2. Транспортовање изолованих тела

Као што је претходно већ истакнуто, најнеповољнији услови транспортовања земљишне масе наступају онда када на платформу поред вишеслојних наслага пристижу и засебна-изолована тела, односно земља у виду тешко дробивог грумења, као и земља помешана са каменчићима. Тада је и неслагање између теоријских и експерименталних резултата највеће, јер је при теоријској анализи честица посматрана као материјална тачка а не као физичко тело на чије кретање битан утицај испољавају његов облик и еластичност, а такође и отпор ваздушне средине.

Управо те разлике међу појединим честицама (чврстим) телима, односно разлике у погледу њихових: величина, облика, брзина, времена трајања лета и слично, нарушавају синхронизацију њиховог кретања, па самим тим и синхронизацију рада платформе. То у пракси значи следеће: чак и онда када су испуњени услови одбацивања (2.2.14') неће све честице бити увек истовремено одбачене од решетке, а такође неће ни све истовремено падати на решетку. То често доводи до тога да се поједине честице уместо у II квадранту (како следује према прорачуну) откидају од решетке знатно касније, понекад чак и у III квадранту. ОвOME свакако да доприноси и извесна сопствена гипкост-еластичност честица, које због тога не попримају одмах пуно убрзање решетке већ извесно време само „поскакују“ на решетку, да би тек после низа „меких“ поскакивања попримиле пуне кинематске параметре (пуно убрзање) решетке.

Иначе, у свему осталом важи оно што је већ истакнуто у оквиру тачке 2.2, што значи да све диференцијалне једначине кретања и обрасци од (2.2.1) до (2.2.14'') остају на снази, па се и у овом случају сви фактори који утичу на транспортовање изолованих тела (грумења) могу приказати блок шемом датом на слици 11.



Сл. 11. Блок шема утицајних фактора на транспортовање изолованих тела (грумења земље) дуж решетке осцилаторне платформе

2.4. ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ФИНОЋУ СЕПАРАЦИЈЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ ПОМОЋУ ОСЦИЛАТОРНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПЛАТФОРМИ

Да би се процес сепарације земљишне масе могао успешно изучавати, уводи се величина η , тј. коефицијент потпуности сепарације, који би био једнак јединици онда када би сва маса пристигла на платформу била у потпуности просејана. Међутим, он је у стварности увек мањи од јединице, услед деловања различитих поремећајних фактора који отежавају споменуте процесе издвајања. Истраживања сепарирајућих способности платформе у земљишном каналу показала су да сепарација, тј. просејавање земље платформом зависи од следећих фактора:

- режима осциловања-фреквенције изражене преко минутног броја обртаја ексцентарског вратила (n) и амплитуде осциловања (A);
- влажности земље (w) исказане у процентима [%];
- величине отвора (перфорација) на решетки (d);
- специфичног напајања, тј. количине земље дотурене на платформу (Q_{sp}).

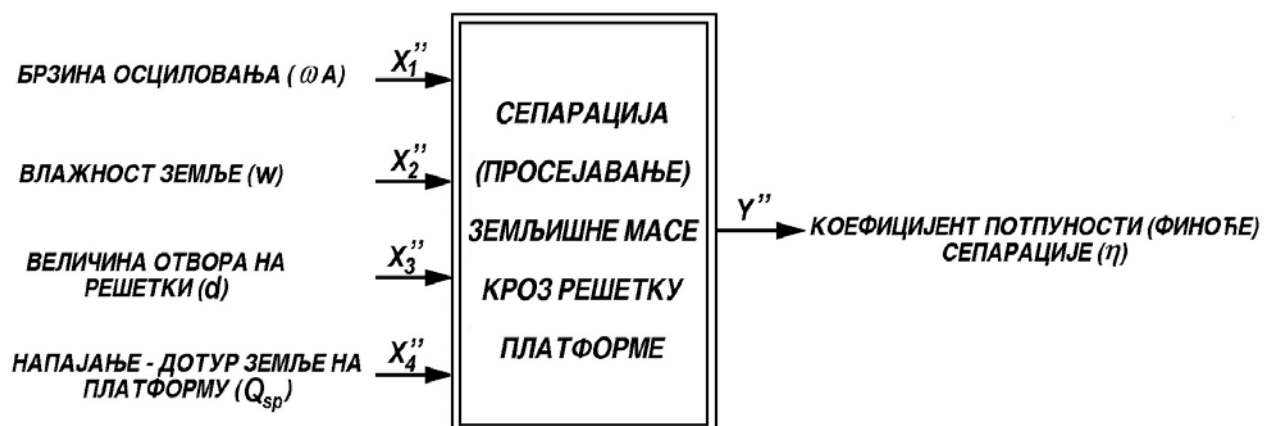
• Сprovedена истраживања показала су да *режими осциловања* (величине n , A , односно *брзина осциловања* ωA као њихов еквивалент) не показују битнији утицај на коефицијент η када је у питању сува и неугрудвана земља, јер η тада варира у границама од 0,92 до 0,98, што значи да има врло високу вредност. Међутим, када је у питању влажна и пластична земља, уочава се да повећање брзине осциловања ωA (али само до извесне границе) доводи до делимичног повећања коефицијента η и то за неких (10÷15)%. Даље повећање брзине осциловања ωA не доводи до никаквих побољшања у погледу сепарације влажне и пластичне земље.

- *влажност земље* (w) је јако утицајан фактор на величину коефицијента η , нарочито ако је у питању тешка глинаста земља (иловача) код које се при повећању влажности сепарација у потпуности снижава у оштро израженим границама, а испољава се у извесној мери и ефекат пластичности земље. При томе се могу издвојити зоне добре сепарације (приближно до 23% влажности) и зоне лоше сепарације (од 23% до 27% влажности). При влажности земље од око 30% сепарација исте кроз решетку осцилаторне платформе практично се у потпуности обуставља ($\eta \approx 0$).

- Теоретске анализе и извршени огледи у земљишном каналу показали су да при процесима сепарације важну улогу игра и *величина отвора на решетки* (d). При дотурању на платформу суве и неугрудване земље иста бива скоро у потпуности просејана кроз решетку ($\eta \approx 1$), што значи да коефицијент потпуности сепарације не зависи много од величине отвора на решетки. Међутим, при сепарацији земље повишене влажности коефицијент η директно је пропорционалан величини отвора решетки и расте с повећањем величине ових отвора све до влажности од око $w \approx 25\%$. Изнад ове влажности сепарација се не повећава чак ни при осетном повећању величине отвора на решетки.

- Коефицијент потпуности сепарације η знатно се смањује ако се повећава напајање, односно *дотур земље на платформу*. Дотур се најчешће изражава величином Q_{sp} која представља *напајање платформе земљом по јединици дужине платформе и у јединици времена* (стога је то у ствари специфично напајање платформе земљом, а изражава се у $[kg/(s \cdot m)]$). За сепарацију суве и неугрудване земље сматра се да је оптимално специфично напајање од $Q_{sp} = (60 \div 70) kg/(s \cdot m)$ јер је тада $\eta \approx 0,90$, док је при сепарацији влажне и пластичне земље коефицијент η знатно нижи и много мање зависи од специфичног напајања Q_{sp} . Исто тако, треба имати у виду да при специфичном напајању земљом са $Q_{sp} > 70 kg/(s \cdot m)$ рад осцилаторне платформе постаје знатно отежан услед самоистоваривања чврсте масе. Стога такво претоваривање платформе земљом треба у пракси избегавати.

И у овом случају сви споменути фактори који утичу на ефикасност процеса сепарације земљишне масе могу се приказати шематски, као што је и учињено на слици 12.



Сл. 12. Блок шема утицајних фактора на сепарацију земљишне масе кроз решетку осцилаторне платформе

3. МЕТОДОЛОШКИ ПРИСТУП И ТОК ИСТРАЖИВАЊА

3.1. ПРОБЛЕМ ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру досадашњег теоријског излагања проблематике везане за транспорт, разбијање и сепарацију земљишне масе помоћу машина са уграђеним вибрационим осцилаторним платформама, константоване су следеће чињенице:

- извршена је идентификација радних параметара који утичу на радни учинак, тј. на производност осцилаторних платформи (тачка 2.1);
 - доказано је математичким путем да се најбољи ефекат транспорта земљишне масе постиже при режиму рада платформе са одбацивањем материјала, који наступа онда када платформа у погледу свог убрзања испуњава услове дате једначином (2.1.5). То истовремено подразумева да у тим случајевима платформа мора радити са оптималном учестаношћу односно са оптималним бројем обртаја ексцентарског вратила, који се одређују на основу једначине (2.2.14') у функцији од три величине које претходно морају бити усвојене: A , α , β (тачка 2.2);
 - на способност платформе за транспорт земљишне масе знатно утиче карактер оптерећења односно врста оптерећења платформе. При томе су најповољнији услови за транспорт онда када на платформу пристиже земљишна маса у виду вишеслојних наслага, а најнеповољнији када на платформу долазе засебна тј. изолована тела, односно земљишно грумење (тачка 2.3);
 - истраживања сепарирајућих способности платформе врше се у специјалном лабораторијском огледном постројењу - тзв. земљишном каналу. Она су показала да сепарација, тј. просејавање земље кроз решетку платформе не зависи само од конструкције платформе и режима њеног осциловања, него веома много и од састава и влажности земље w исказане у процентима [%], а такође и од количине земље дотурене на платформу.
-

Уопште узев, најбољи радни ефекти и у погледу транспорта и у погледу сепарације постижу се при раду са сувом и меком земљом без присуства чврстих грудви, каква је уосталом и коришћена у току експерименталне фазе истраживања које је аутор ове дисертације обавио на прототипу осцилаторне платформе који је развијен на Техничком факултету у Чачку (сл. 4). У току израде свог магистарског рада [1] аутор дисертације извршио је оптимизацију радних параметара вибрационих осцилаторних платформи са аспекта разбијања и сепарације транспортоване масе, за рад са сувом и неугрудваном земљом. Под таквим околностима, експериментална платформа увек је беспрекорно обављала предвиђену радну функцију.

Међутим, искуство из експлоатације стечено у протекле две деценије показало је да проблеми у раду осцилаторне платформе наступају након обилних киша, када се влажност земље *w* јако повећа. Тада је ефекат транспорта и сепарације најслабији, због лепљења влажне земље за раоник који је у том случају веома тешко поткопава. У појединим случајевима долазило је и до потпуног онемогућавања рада платформе. Ово је само потврдило већ познату чињеницу да је влажност земљишне масе *w* исказана у % један од најугицајнијих фактора од кога зависе њен транспорт, сепарација и просејавање кроз решетку (сито) осцилаторне платформе.

Стога је аутор дисертације дошао на идеју да обави једно ново теоријско и практично истраживање споменуте проблематике, којим би се установило какав би био рад осцилаторне платформе у екстремно тешким радним условима и то код максимално влажне и пластичне земље (тзв. "тешке иловаче").

Имајући у виду све што је претходно истакнуто, главни проблем који ће бити третиран у овом истраживању могао би се исказати на следећи начин:

- теоријским путем извршити динамичко моделирање процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе на осцилаторној платформи и правилну интерпретацију добијених резултата моделирања. Циљ је да се дође до таквог математичког модела који ће што верније симулирати процесе поткопавања, транспорта и просејавања влажне земљишне масе, како би се уштедело време и смањили трошкови који би били неминовни при дуготрајним практичним испитивањима на класичном прототипу.

- експерименталним путем такође створити математички модел који адекватно описује процесе сепарације и просејавања влажне земљишне масе на осцилаторној платформи, у реалним условима експлоатације.

- на крају је потребно извести одговарајуће закључке због којих је цело истраживање и спроведено, тј. на основу свих добијених резултата, извршити оптимизацију рада осцилаторних платформи са аспекта сепарације и просејавања влажне земљишне масе.

Резултати и закључци добијени једним оваквим комплексним и мултидисциплинарним истраживањем били би корисни за модификацију већ постојећих, а такође и за израду потпуно нових наменских машина које у свом раду користе осцилаторне платформе за сепарацију и просејавање влажне земљишне масе.

3.2. СТЕПЕН ИСТРАЖЕНОСТИ ДЕФИНИСАНОГ ПРОБЛЕМА И ОПРАВДАНОСТ ИСТРАЖИВАЊА

Колико је аутору овог рада познато, проблемима ове врсте, тј. оптимизацијом радних параметара вибрационих осцилаторних платформи, бавио се релативно мали број истраживача. У литератури [24] има података да су се овом проблематиком донекле бавили: Џенелидзе, Бленхајм и Олевски (земље бившег СССР-а), који су дали извесне подлоге на основу којих би се могла спровести сва споменута истраживања. Ове подлоге заснивају се на:

- *теоретским истраживањима*, која су спроведена на бази чињенице да се реално физичко тело може сматрати крутим телом састављеним од мноштва материјалних тачака, на које се могу применити важећи закони из балистичке теорије. Другим речима, пошло се од претпоставке да се честица која се налази у слободном лету (при режиму рада са одбацивањем материјала) у свему понаша по законитостима кретања које важе за „коси хитац”. На тај начин, долази до међусобног сударања између већег броја честица које се истовремено налазе у слободном лету, чиме се врше транспорт, разбијање и уситњавање чврсте масе помоћу вибрационе осцилаторне платформе;

- *практичним истраживањима*, која су спроведена у „земљишном каналу”- лабораторијском огледном постројењу на којем су добијени сви релевантни резултати и то применом најразноврснијих истраживачких метода. Од свих метода посебно се издваја метода анализе кретања честица путем тзв. „кинограма”, тј. брзинских филмских снимака начињених са веома кратком експозицијом (1/1000 део секунде и још краће). У једној секунди начини се и по двадесетак оваквих снимака, чијом се каснијом анализом одређују путање и карактер кретања честица.

Споменутих два метода - *методом косог хица* и *методом кинограма*, добијени су скоро сви релевантни подаци презентирани у глави 2 ове дисертације.

Иначе, што се практичне реализације тиче, према расположивим подацима из литературе, познато је да су до сада реализоване следеће значајније вибрационе осцилаторне платформске машине:

- универзални комбајни: тип КГП-2 и тип ККУ-2 (већ постојеће машине на којима је извршена модификација, тј. уградња осцилаторних платформи);
 - жетелачке платформске машине: ЛКГ-1,4 (за лук) и ККГ-1,4 (за коренасте плодове), све у бившем СССР-у;
 - неке вибрационе машине за просејавање песка за потребе нискоградње и високоградње произведене у Италији, Аустрији, Немачкој и још неким земљама.
-

На просторима бивше Југославије, према расположивим сазнањима, до краја прошлог века нису биле реализоване никакве машине оваквог или сличног типа, које за истовремени транспорт и сепарацију чврстог материјала користе вибрационе осцилаторне платформе. Прва таква машина код нас управо је вадиллица кромпира ТИП VWK-10 (сл. 4), која је развијена на Техничком факултету у Чачку (1995. год.). Вадиллица је најпре служила у експерименталне сврхе током реализације прве фазе научно-истраживачког пројекта под називом *"Истраживање и развој машина за убирање кромпира"* у коме су, поред Техничког факултета, учествовали још и Агрономски факултет из Чачка, Пролетер из Ариља и Институт за кромпир у Гучи, који је касније откупио вадиллицу за сопствене потребе.

Две године касније (1997. год.), на Техничком факултету у Чачку развијен је прототип двосите верзије вадиллице ТИП VWK-20 (сл. 13), коју уствари чине две паралелно постављене једносите вадиллице ТИП-а VWK-10, чија сита се крећу у супротним смеровима (осцилују у супротним фазама) да би се анулирале снажне инерционе силе које делују у раду платформе [25]. Фазна помереност између сита (угао φ на сл. 1) износи 180° , што је постигнуто заокретањем ексцентара на ексцентарским вратилима у супротне стране. Ова двосита вадиллица има знатно тиши и мирнији рад у односу на једноситу, а такође и већи радни учинак (производност) јер поседује радни захват од 1100mm (са празним простором-међуразмаком од 180mm између два сита), наспрам радног захвата од 460mm код једносите вадиллице. Оба типа вадиллице имају исту дубину поткопавања раоником која се може подешавати у опсегу $(0\div 280)\text{mm}$.

У односу на класичне машине за транспорт земљишне масе путем разних "бескрајних транспортних трака" које се релативно брзо хабају, код вибрационих осцилаторних платформи нема изразито хабајућих делова.

Обе верзије вадиллице (и једносита и двосита) патентиране су код *Савезног завода за интелектуалну својину* и патенти су заведени под следећим називом:

- Ⓟ Вибрационо-њихајући прихватни систем за убирање повртарских култура-једноредан Тип VWK-10;
- Ⓟ Вибрационо-њихајући прихватни систем за убирање повртарских култура-дворедан Тип VWK-20.

Према међународној класификацији патената (МКР), патент спада у групу:

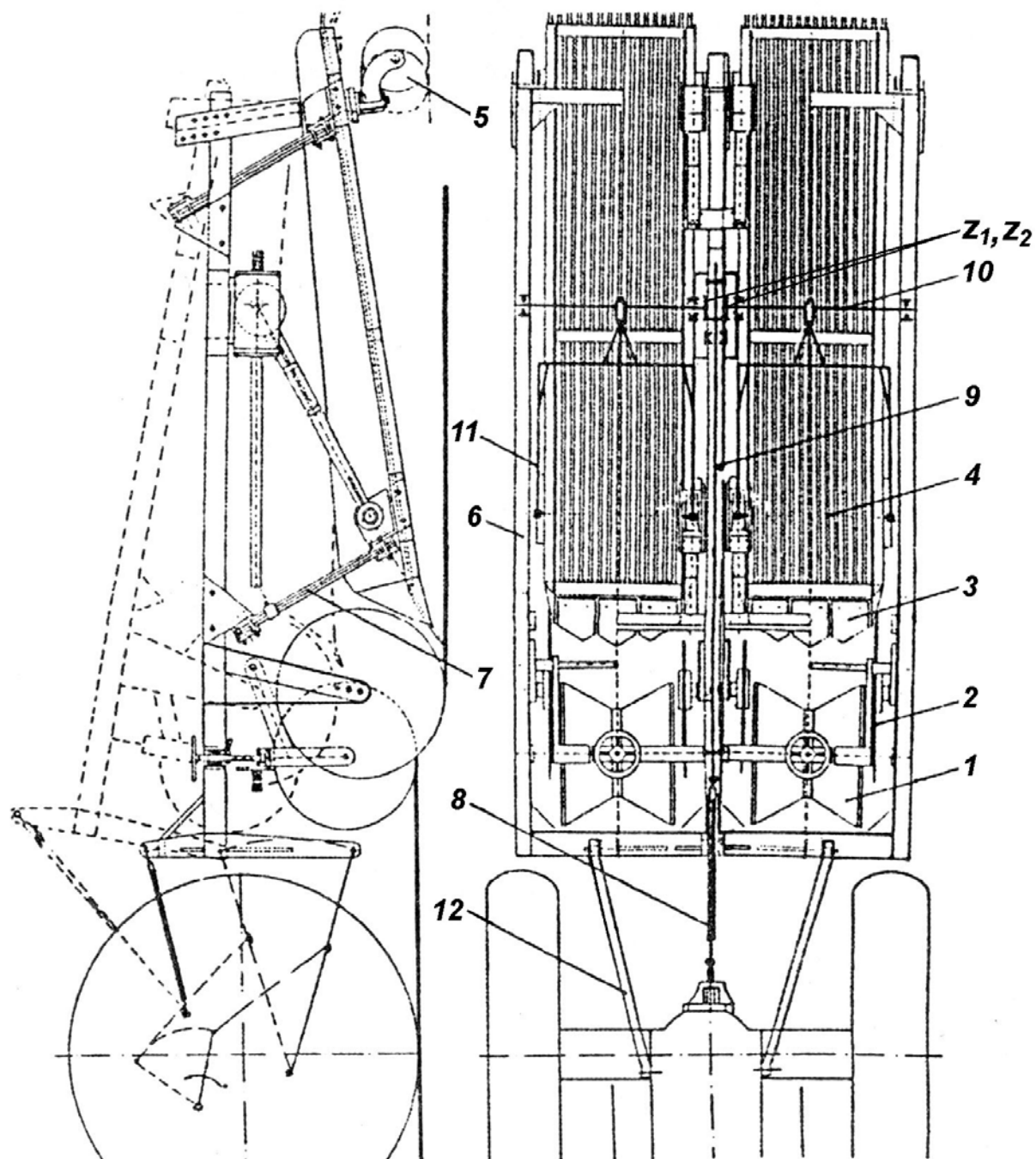
F16F15/22 – Машинство, Машински елементи, Опруге, Компензација сила инерције;

Патент се такође дотиче и следећих група:

F 16 H 33/20 – Машинство, Машински елементи, Преносници, Осцилаторно кретање;

B 07 B 1/280 – Разбијање чврстих материја, Решетке, Вибрациона сита са наизменичним кретањем и потресима;

B 06 B – Разбијање чврстих материја, Сита, Уређаји са вибрационим дејством и ударним потресима.



ЛЕГЕНДА:

1. ДОБОШ;
 2. НОЖ (ЦРТАЛО);
 3. ВИБРАЦИОНИ РАОНИК;
 4. ОСЦИЛАТОРНА ПЛАТФОРМА;
 5. ОБРТНИ ТОЧАК;
 6. НОСЕЋИ РАМ (СКЕЛЕТ);
 7. ВЕШАЊЕ ПЛАТФОРМЕ (ЛИСНАТА ОПРУГА);
 8. ТЕЛЕСКОПСКО ВРАТИЛО;
 9. ТРАНСМИСИОНО ВРАТИЛО;
 10. ЕКСЦЕНТАРСКО ВРАТИЛО;
 11. ПОГОНСКА ПОЛУГА ЕКСЦЕНТРА;
 12. ТРАКТОР;
- Z_1, Z_2 - КОНУСНИ ЗУПЧАСТИ ПАР.

Сл. 13. Шематски приказ двосите вибрационе осцилаторне платформе примењене у пољопривреди [25]

Имајући у виду чињеницу да су сви до сада познати подаци о раду оваквих машина у екстремно тешким условима недовољни за праксу, аутор је нашао за сходно да је потребно спровести једно детаљније теоријско и практично истраживање у циљу потпунијег сагледавања споменутих процеса. Акцент је пре свега на процесима сепарације и просејавања влажне земљишне масе. Резултати добијени једним таквим свеобухватним истраживањем имали би универзални карактер. То значи да би се сасвим сигурно могли аплицирати у пракси како код пројектовања, тако и код израде и експлоатације разних технолошких и машинских система у различитим областима и гранама технике (пољопривредна механизација, грађевинарство, рударство, процесна индустрија и сл.).

3.3. ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА

Циљеви истраживања директно проистичу из претходно дефинисаног проблема истраживања. Да би се исти у потпуности реализовали, потребно је у току истраживања применити мултидисциплинарни приступ који се првенствено огледа у следећем:

→ користити знања стечена изучавањем свих техничких наука (статика, динамика, машински материјали, машинске конструкције, трибологија, итд.);

→ користити већ изведена решења на другим – сличним конструкцијама;

→ поштовати препоруке дате у разним стандардима, перспективама, каталогима произвођача и слично, као и лична искуства других конструктора, сервисера и корисника сличних машина или уређаја.

Циљеви истраживања најкраће се могу исказати преко низа активности које треба реализовати у току самог истраживања:

1. Теоријским путем извршити динамичко моделирање процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе у функцији времена узимајући у обзир све утицајне факторе на ове процесе, као и теоријске поставке наведене у глави II ове дисертације.

2. Експерименталним путем створити оригиналан математички модел којим се описују процеси сепарације и просејавања влажне земљишне масе, односно рад платформе у екстремно тешким реалним експлоатационим условима.

3. Извршити анализу резултата спроведених истраживања и након тога их на адекватан начин интерпретирати и представити, како би исти били на располагању свим заинтересованим корисницима, односно установама и појединцима који се баве наведеном проблематиком.

4. Извести одговарајуће закључке на основу добијених резултата истраживања, односно извршити оптимизацију радних параметара који утичу на сепарацију и просејавање влажне земљишне масе.

5. На крају дати предлоге за будућа слична или нова истраживања, код којих се као радне хипотезе могу искористити резултати и закључци до којих се дошло у овом истраживању.

3.4. ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА

На основу наведених циљева истраживања, а имајући на уму закључке који би требало да проистекну из самог истраживања, могу се поставити следеће *хипотезе истраживања*, чија ће се тачност или прихватити или одбацити:

• *Хипотеза* (H_1) •

Процес сепарације (просејавања) влажне земљишне масе кроз решетку платформе може се приказати засебним *теоријским математичким моделом*, узимајући при том у обзир све познате теоријске чињенице и одлике самог процеса. При томе се уводи претпоставка да је при било којим радним режимима рад платформе увек *стабилан*, односно да се њен радни учинак (производност) битно не нарушава услед дејства било каквих спољашњих поремећаја.

• *Хипотеза* (H_2) •

Процес сепарације (просејавања) влажне земљишне масе кроз решетку платформе може се приказати оригиналним *експериментално добијеним математичким моделом*, узимајући при том у обзир све утицајне факторе приказане на сл. 12 (стр. 23). То значи да се уводи претпоставка да су све четири наведене величине: брзина осциловања (ωA), влажност земље (w), величина отвора на решетки (d) и специфично напајање платформе земљом (Q_{sp}) *сигнификантне-значајне величине*, а такође и претпоставка да је постављени *математички модел адекватан*. Тачност (или нетачност) наведене претпоставке биће потврђена (или демантована) статистичким поступком познатим под именом дисперзиона анализа.

Полазну основу за наведене хипотезе чине релевантни резултати теоријских и експерименталних истраживања наших претходника, а који су презентирани у глави II ове дисертације.

3.5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ПРОМЕНЉИВЕ

У овом, као и у сваком другом истраживању, могуће је разликовати:

- *зависне променљиве* (појаве или процеси који се посматрају, односно који се проучавају ради извођења одређених закључака);
- *независне променљиве* (фактори који се у експеримент намерно уносе или мењају, да би се пратио или мерио њихов утицај на зависне променљиве).

Независне променљиве су према томе *узрок* зависних променљивих, односно зависне променљиве су *последица* независних променљивих. Посматрајући поново слике 10, 11 и 12 на странама 21, 22 и 23, могу се идентификовати следеће зависне и независне променљиве:

3.5.1. Зависне променљиве

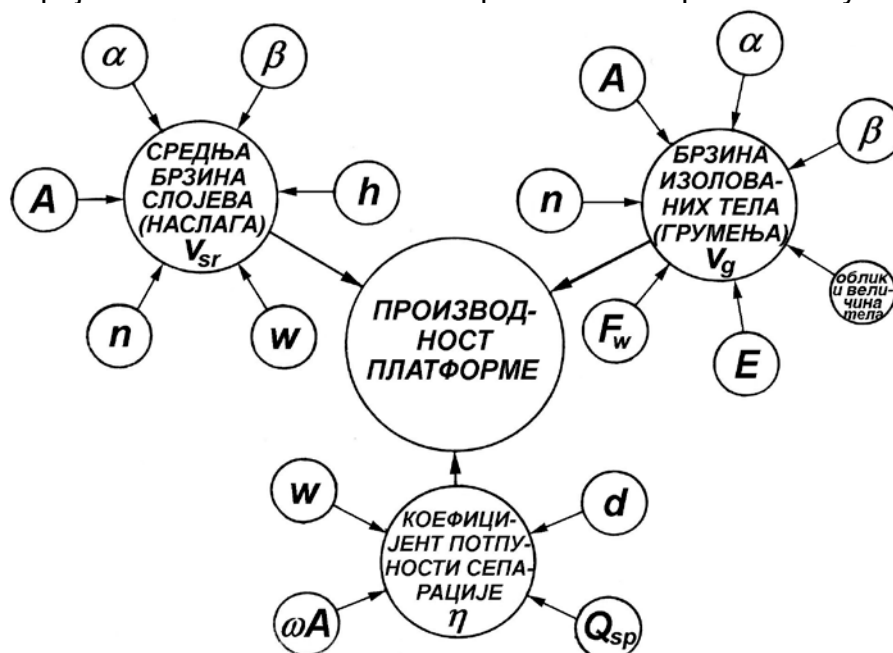
- 1) средња брзина померања слојева (наслага) земљишне масе по платформи (v_{sr});
- 2) брзина померања изолованих тела (грумења земље) по платформи (v_g);
- 3) коефицијент потпуности (финоће) сепарације (η).

Све три наведене величине: v_{sr} , v_g и η утичу на *радни учинак (производност) вибрационе осцилаторне платформе*.

3.5.2. Независне променљиве

- 1) број обртаја ексцентарског вратила платформе (n), или њему еквивалентна кружна фреквенција обртања (ω);
- 2) амплитуда осциловања (A);
- 3) брзина осциловања (ωA), када се посматра заједнички утицај величина ω и A на осцилаторни систем, а не њихово појединачно деловање;
- 4) угао нагиба решетке према хоризонтали (α);
- 5) угао транспорта платформе (β);
- 6) висина дотурених слојева земљишне масе (h);
- 7) влажност земље (w);
- 8) облик и величина изолованих тела (грумења земље и каменчића);
- 9) еластичност - гipкост грумења земље и каменчића (E);
- 10) отпор ваздушне средине (F_w);
- 11) величина отвора на решетки (d);
- 12) специфично напајање (дотур) земље на платформу (Q_{sp}).

Све побројане зависне и независне променљиве приказане су на слици 14.



Сл. 14. Експерименталне променљиве које утичу на радни учинак (производност) вибрационе осцилаторне платформе

3.6. ПОСТУПЦИ И ТЕХНИКЕ ЗА ЕЛАБОРАЦИЈУ ПРИКУПЉЕНИХ ПОДАТАКА И ИЗМЕРЕНИХ РЕЗУЛТАТА

У складу са постављеним циљевима истраживања, потребно је извршити избор конкретних поступака и техника за обраду и анализу како теоријских, тако и експерименталних података и измерених резултата. У свим наредним фазама истраживања, биће коришћени следећи опште прихваћени елаборациони поступци и технике:

1. *динамичко моделирање процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе на осцилаторној платформи* – за анализу реалних физичких система (а ту спадају и технички системи) морају се формирати математички модели тих система. Како су реални системи динамички системи, то се за њихово приказивање могу користити само диференцијалне једначине које су саме по себи веома сложене и често гломазне за решавање ако се решавају класичним математичким методама.

Стога исте за време моделирања неће бити решаване уобичајеним математичким методама, већ коришћењем специфичних математичких метода које омогућују да се на бржи и лакши начин изврши анализа динамичког понашања система. Такве су на првом месту „Лапласове трансформације“ помоћу којих се диференцијалне једначине из временског домена пресликавају у алгебарске једначине у домену комплексне променљиве, јер је знатно лакше решавати алгебарске него диференцијалне једначине. Затим се добивено решење из домена комплексне променљиве поново преводи у временски домен, поступком познатим под именом „инверзна Лапласова трансформација“.

2. *тест понашања система на релацији улаз-излаз* – ово је тзв. концепт црне кутије којим се у потпуности описује понашање целог система на основу излазне величине из система, а све у функцији познате побудне-улазне величине система. Споменуто тестирање врши се анализом преносне функције система и то у домену комплексне променљиве. При овоме се не узима у обзир унутрашње стање, односно не врши се анализа унутрашње структуре проучаваног система.
3. *тест стабилности система* – овим тестом долази се до конкретног сазнања о томе каква је постојаност система у неком дужем временском интервалу (теоретски за $t \rightarrow \infty$) и то након престанка дејства поремећаја на улазу у систем. То значи да се закључци о стабилности могу донети на основу одзива система на познати улаз или поремећај, при чему се стање система квалитативно категорише на један од два могућа начина и то као: систем стабилан или систем нестабилан. За испитивање стабилности линеарних система могу се користити различити критеријуми (Routh-ов, Hurwitz-ов, Nyquist-ов).

4. *вишефакторни ортогонални план извођења експеримента* – овај план омогућава да се приликом експерименталног истраживања просејавања и сепарације земљишне масе истовремено варирају сви утицајни фактори према унапред дефинисаном плану. Разлози због којих је одабран баш овај план јесу ти што се њиме добија врло реална слика о понашању проучаваног техничког система, уз релативно лако постављање адекватног математичког модела. Затим, потребно је знатно краће време испитивања у односу на друге познате планове. И најзад, мањи су трошкови истраживања у поређењу са осталим плановима. Код овога плана најпре је потребно одабрати интервале варирања појединих утицајних фактора – „факторске нивое“, а онда по унапред сачињеном плану испитивања извршити мерење њиховог утицаја на проучавану појаву или процес (у нашем случају на процес просејавања и сепарације земљишне масе), ради добијања жељених резултата.

На крају се приступа статистичкој обради резултата извршених мерења, што се код овог плана увек изводи у три карактеристичне фазе:

- I) *регресиона анализа* - састоји се у одређивању регресионих коефицијената, чиме се добија представа о утицају појединих фактора на проучавану излазну функцију;
- II) *дисперзиона анализа* - састоји се у одређивању сигнификантности (значајности) регресионих коефицијената и утврђивању адекватности добијеног математичког модела;
- III) *декодирање математичког модела* - то је "превођење" математичког модела из „кодираног“ у „декодирани“ облик, како би исти постао апликативан за примену у пракси.

3.7. ПЛАН И ТОК ИСТРАЖИВАЊА

Након дефинисања проблема, циљева и основних хипотеза истраживања, као и експерименталних променљивих утицајних на процесе сепарације и просејавања влажне земљишне масе на платформи, приступа се РЕАЛИЗАЦИЈИ самог истраживања које ће бити изведено у две фазе:

♦ У првој фази – *фази теоријског истраживања*, биће извршено динамичко моделирање процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе кроз решетку осцилаторне платформе, како би се прихватила или одбацила хипотеза (H_1) постављена у оквиру тачке 3.4 (стр. 30). Тестираће се динамичко понашање проучаваног система на релацији улаз-излаз, као и тестирање стабилности система, на основу претходно састављеног математичког модела.

♦ У другој фази – фази експерименталног истраживања, извршиће се практична верификација постављене хипотезе (H_2) (стр. 30) помоћу вишефакторног ортогоналног плана извођења експеримента, који ће дати одговор на питање да ли процес сепарације (просејавања) влажне земљишне масе кроз решетку осцилаторне платформе заиста зависи од сва четири наведена параметра (ωA , w , d , Q_{sp}). Тиме ће се доћи до конкретног сазнања да ли су све четири величине сигнификантне тј. значајне величине. Комплетна експериментална фаза истраживања изведена је у лабораторијским условима на „Техничком факултету“ у Чачку, као и у реалним експлоатационим условима на засадима Института за кромпир у Гучи, који су за време извођења експеримента ставили на располагање све своје расположиве: материјалне, организационе и кадровске потенцијале.

Након реализације обе наведене фазе, биће изведени конкретни закључци до којих се дошло у току проучавања споменуте проблематике, како би исти постали релевантни и доступни свим заинтересованим корисницима.

На крају рада биће изнети неки од могућих предлога, препорука и сугестија за нека нова будућа истраживања проблематике која је у вези са процесима сепарације и просејавања влажне земљишне масе помоћу вибрационих осцилаторних платформи.

4. ДИНАМИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА СЕПАРАЦИЈЕ И ПРОСЕЈАВАЊА ВЛАЖНЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ НА ОСЦИЛАТОРНОЈ ТРАНСПОРТНОЈ ПЛАТФОРМИ

4.1. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ (У ФУНКЦИЈИ ВРЕМЕНА) ПРОЦЕСА СЕПАРАЦИЈЕ И ПРОСЕЈАВАЊА ВЛАЖНЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ НА ОСЦИЛАТОРНОЈ ТРАНСПОРТНОЈ ПЛАТФОРМИ

На слици 15 дат је шематски и графички приказ осцилаторне транспортне платформе кроз чију решетку се врши просејавање влажне земљишне масе, при чему се анализирају следећи параметри:

$Q_1 \left[\frac{m^3}{s} \right]$ - количина дотурене влажне земље на платформу (напајање земљом);

$Q_2 \left[\frac{m^3}{s} \right]$ - количина просејане влажне земље кроз решетку платформе;

$P [m^2]$ - укупна површина решетке платформе кроз коју се врши просејавање влажне земљишне масе, при чему је:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n (l \cdot d) = \prod_{i=1}^n (n \cdot P_i) \quad (4.1.1)$$

$P_i [m^2]$ - елементарна површина једног (i-тог) поља решетке платформе кроз коју се врши просејавање влажне земљишне масе (сл. 15.а);

$l [m]$ - дужина решетке платформе кроз коју се врши просејавање влажне земљишне масе;

$d [m]$ - величина отвора (перфорација) на решетки платформе;

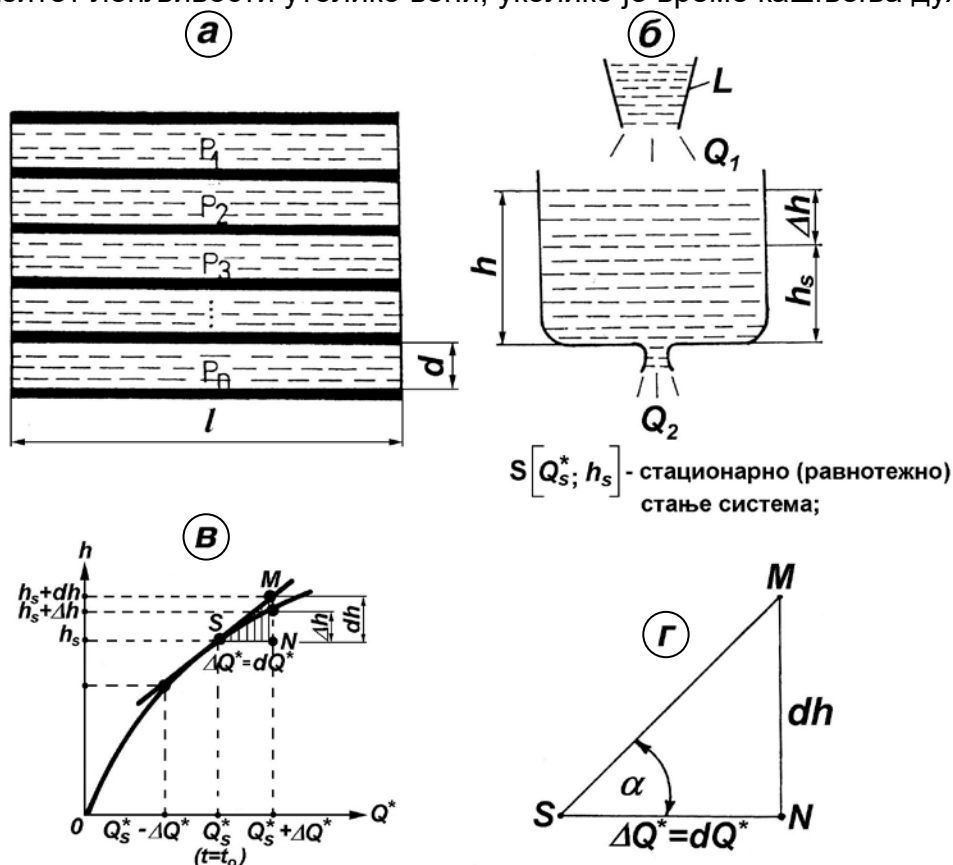
n - укупан број елементарних поља на решетки платформе.

Ако на решетку платформе пристиже сува и неугрудвана земљишна маса (најоптималнији услови за транспорт и сепарацију чврсте масе), тада је ефекат сепарације и просејавања максималан и *коэффициент финоће (потпуности сепарације)* је близак јединици ($\eta \approx 1$, тј. $Q_1 \approx Q_2$). Просејавање масе отпочиње истога тренутка када чврста маса доспе на решетку платформе (нема никаквог "кашњења").

Међутим, ако на решетку платформе пристиже влажна и пластична земљишна маса (најнеповољнији услови за транспорт и сепарацију чврсте масе), коэффициент финоће-потпуности сепарације нагло опада и у екстремним случајевима тежи нули ($\eta \rightarrow 0$), што може проузроковати потпуни губитак радног ефекта платформске машине. Тада се може дефинисати нови параметар којим се исказује *количина непресејане влажне земље* $Q^* [m^3/s]$, а која износи:

$$Q^* = Q_1 - Q_2 \quad (4.1.2)$$

Овде је посебно важно напоменути да просејавање влажне земљишне масе неће отпочети истог тренутка када је она пристигла на решетку платформе, већ после извесног времена τ које се назива *време кашњења* излазног параметра (Q_2) у односу на улазни параметар (Q_1). Разлог овог кашњења јесте лепљење влажне земљишне масе за решетку платформе, због јаких кохезионих и адхезионих сила које доприносе томе да се између честица земље и решетке ствара специфичан физичко-хемијски спој кога је тешко раставити. Као мера споменуте лепљивости служи време кашњења τ , које се у математичком моделу условно може схватити као величина која би била аналогна некаквом "коэффициенту лепљивости" којим би био исказан интензитет споменуте лепљивости. При томе важи основно правило да је интензитет лепљивости утолико већи, уколико је време кашњења дуже.



Сл. 15. Шематски и графички приказ процеса сепарације влажне земљишне масе помоћу осцилаторне транспортне платформе

Ако се кроз неки левак (L) на платформу дотура влажна земљишна маса (сл. 15.б), анализа процеса просејавања почиње од неког временског тренутка $t=t_0$ у коме се према (4.1.2) успоставља равнотежно тј. стационарно стање између просејане и непросејане земље, што одговара тачки S на дијаграму просејавања (сл. 15.в).

Ако се даље претпостави да је се дотур влажне земље на платформу изненада повећао за неку вредност ΔQ_1 , тада ће се и висина земље на платформи повећати за неку вредност Δh , а самим тим ће се повећати и количина влажне просејане земље за вредност ΔQ_2 (сл. 15.б). Прираштај нивоа влажне земље на платформи у јединици времена ће износити:

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_1 - (1 - K\tau)\Delta Q_2}{P} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4.1.3)$$

$K_\tau = [0...1]$ - коефицијент кашњења просејане земље у односу на дотурену земљу, а који има екстремне вредности у следећим случајевима:

$K_\tau = 0$ - код потпуно суве и неугрудване земље ($\eta \approx 1$, тј. $Q_1 \approx Q_2$, скоро сва дотурена земља била би у потпуности просејана, тада би и време кашњења износило ≈ 0);

$K_\tau = 1$ - код максимално влажне и пластичне земље ($\eta = 0$, дошло би до потпуног обустављања рада платформе, тј. до потпуног престанка просејавања због тоталног лепљења земље за решетку, при чему би време кашњења тежило бесконачности, $\tau \rightarrow \infty$).

За разлику од суве и неугрудване земље где би дијаграм просејавања био представљен правом линијом (линеарна функција), код влажне и пластичне земље ток просејавања има нелинеаран карактер и зато је приказан кривом линијом. Стога је у овом случају потребно применити поступак *линеаризације*, тј. апроксимације дела функције правом линијом (полиномом првога реда). У теорији математичког моделирања најчешћи је случај да се део функције $f(x)$ апроксимира тангентом у близини неке карактеристичне тачке на дијаграму. Та тачка ће у нашем случају бити тачка $S [Q^*_S; h_S]$, за коју је већ речено да представља равнотежно стање система.

Ако се прираштај нивоа влажне земље Δh напише преко диференцијала, добија се:

$$d(\Delta h) = \frac{1}{P} [\Delta Q_1 - (1 - K\tau)\Delta Q_2] dt \quad (4.1.4)$$

Када се посматра троугао SMN на сл. 24.в и на сл. 24.г, могуће је уочити следећу зависност:

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{dh}{dQ^*} \quad (4.1.5)$$

$$K^* = \frac{1}{k} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{dQ^*}{dh} \quad (4.1.6)$$

k - коефицијент правца праве која представља график количине влажне непросејане земље кроз решетку платформе.

На основу правила познатих из теорије диференцијалног рачуна, добија се:

$$\frac{dh}{dQ^*} \approx \frac{\Delta h}{\Delta Q^*}$$

$$\Delta Q^* \cdot dh \approx \Delta h \cdot dQ^*$$

$$\Delta Q^* \approx \frac{dQ^*}{dh} \Delta h \approx \operatorname{ctg} \alpha \cdot \Delta h \approx K^* \cdot \Delta h \quad (4.1.7)$$

У тачки S у којој је успостављено равнотежно стање система такође ће бити успостављена и равнотежа између прираштаја просејане и прираштаја непросејане земље ($\Delta Q_{2S} \approx \Delta Q_S^*$, односно $dQ_{2S} \approx dQ_S^*$), па се у том случају једначина (4.1.7) може написати у следећем облику:

$$\Delta Q_2 \approx \frac{dQ_2}{dh} \Delta h \approx \operatorname{ctg} \alpha \cdot \Delta h \approx K^* \cdot \Delta h \quad (4.1.7')$$

Сменом (4.1.7') у (4.1.4) прираштај нивоа влажне земље Δh ће износити:

$$d(\Delta h) = \frac{1}{P} [\Delta Q_1 - (1 - K_\tau) \cdot K^* \cdot \Delta h] dt \quad / \cdot \frac{P}{dt}$$

$$P \frac{d(\Delta h)}{dt} = \Delta Q_1 - K^* \cdot \Delta h + K_\tau \cdot K^* \cdot \Delta h$$

$$P \frac{d(\Delta h)}{dt} = \Delta Q_1 - (K^* - K_\tau \cdot K^*) \Delta h$$

$$P \frac{d(\Delta h)}{dt} + (K^* - K_\tau \cdot K^*) \Delta h = \Delta Q_1$$

$$P \frac{d(\Delta h)}{dt} + K^* (1 - K_\tau) \Delta h = \Delta Q_1 \quad / : K^*$$

$$\frac{P}{K^*} \frac{d(\Delta h)}{dt} + (1 - K_\tau) \Delta h = \frac{1}{K^*} \Delta Q_1$$

Имајући у виду једначину (4.1.6) може се писати:

$$k \cdot P \frac{d(\Delta h)}{dt} + (1 - K_\tau) \Delta h = k \cdot \Delta Q_1 \quad (4.1.8)$$

Прираштај нивоа влажне земље на платформи Δh је према (4.1.3) очигледно функција и од ΔQ_1 и од ΔQ_2 . Међутим, како је вредност за ΔQ_2 убачена у математички модел преко једначине (4.1.7'), иста у једначини (4.1.8) не фигурише директно већ индиректно, преко коефицијента кашњења просејане земље у односу на дотурену земљу K_τ . Стога једначина (4.1.8) исказује функционалну зависност између прираштаја нивоа влажне земље на платформи Δh и прираштаја напајања тј. дотура влажне земље на платформу ΔQ_1 :

$$\Delta h = f(\Delta Q_1) \quad (4.1.9)$$

Посматрана са математичког аспекта, претходна зависност била би исказана на следећи начин:

$$y = f(x) \quad (4.1.9')$$

Имајући у виду релације (4.1.8), (4.1.9) и (4.1.9') могуће је оформити следеће идентичке једнакости:

$$k \cdot P \equiv T_V; \quad k \equiv \frac{1}{K^*} \equiv K_P; \quad \Delta h \equiv y; \quad \Delta Q_1 \equiv x \quad (4.1.10)$$

Сменом идентичких једнакости (4.1.10) у (4.1.8) и имајући на уму чињеницу да сви реални физички системи функционишу у реалном времену t , добија се следећа зависност између претходно наведених величина:

$$T_V \frac{dy(t)}{dt} + (1 - K_\tau)y(t) = K_P \cdot x(t - \tau) \quad (4.1.11)$$

Поједине величине у (4.1.11) имају следеће значење:

T_V – временска (инерцијална) константа система О-П-РП (окружење-платформа-радни параметри);

K_P – коефицијент (фактор) појачања система О-П-РП (окружење-платформа-радни параметри);

τ – време кашњења излазног-одзивног сигнала система О-П-РП (окружење-платформа-радни параметри) у односу на улазни-побудни сигнал.

Диференцијална једначина (4.1.11) јесте диференцијална једначина првога реда и иста представља *математички модел* процеса сепарације влажне земљишне масе помоћу осцилаторне транспортне платформе у функцији времена t .

4.2. ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ СИСТЕМА О-П-РП (ОКРУЖЕЊЕ-ПЛАТФОРМА-РАДНИ ПАРАМЕТРИ)

Истакнуто је у више наврата да су реални физички системи (у које спадају и технички системи) динамичког карактера [26], чије се понашање у раду може описати једино помоћу диференцијалних једначина. Велики број реалних процеса има претежно нелинеарни карактер, што значи да их математички описују нелинеарне диференцијалне једначине. Рад са нелинеарним диференцијалним једначинама у знатној мери отежава, а често пута и онемогућава детаљно проучавање појава и процеса унутар посматраног система. У многим случајевима где то природа проучаваног проблема дозвољава, могуће је извршити линеаризацију нелинеарних математичких израза којима су описане реалне појаве и процеси.

И у нашем случају (просејавање влажне земљишне масе кроз решетку платформе) ток просејавања има претежно нелинеаран карактер (сл. 15.в), али је у циљу добијања одговарајућег математичког модела извршена линеаризација и то из следећа три разлога:

1. теорија моделирања линеарних система много је развијенија и усавршенија у односу на теорију моделирања нелинеарних система, јер се континуални линеарни процеси (у које се може сврстати и просејавање влажне земљишне масе при непрекидном напајању тј. дотуру земље на платформу) могу приказати помоћу линеарних диференцијалних једначина са константним коефицијентима. За решавање ових диференцијалних једначина постоје како оригиналне математичке методе, тако и специфично развијене посебне методе (такве су на пример Лапласове трансформације);

2. за анализу динамичког понашања и испитивање стабилности линеарних техничких система такође постоје специјално развијене методе (анализа карактеристичне једначине система) и критеријуми (критеријум Routh-а, критеријум Hurwitz-а, критеријум Nyquist-а, ...), што није увек случај код нелинеарних математичких модела;

3. да би се могла извршити компарација ефеката сепарације и просејавања влажне земље са сувом и неугрудваном земљом, јер је према [1] математички модел за суву и неугрудвану земљу био линеарног карактера, пошто је скоро сва земља пристигла на решетку платформе бивала скоро у потпуности просејана ($\eta \approx 1$, $Q_1 \approx Q_2$).

Сходно важећим начелима, сви линеарни технички системи испуњавају два основна принципа:

I) *принцип пропорционалности* – између улазне величине система $x(t)$ и излазне величине система $y(t)$ постоји једна од следеће две могуће релације:

$$y(t) = K(t) \cdot x(t) \tag{4.2.1}$$

или:

$$y(t) = K \cdot x(t) \tag{4.2.2}$$

$K(t) \neq \text{const}$ – фактор пропорционалности дат у облику функције времена;

$K = \text{const}$ – статички фактор пропорционалности (није функција времена);

II) *принцип неометане суперпозиције* – ако на систем истовремено делују више улазних величина: $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_m(t)$, тада је одзив система $y(t)$ једнак збиру одзива свих улазних величина, као када би исте дејствовале појединачно (различита, међусобно независна парцијална дејства сабирају се и чине укупно дејство):

- улазни сигнал $x_1(t)$ проузрокује → излазни сигнал $y_1(t)$;
 - улазни сигнал $x_2(t)$ проузрокује → излазни сигнал $y_2(t)$;
 -
 -
 -
- (4.2.3)

• улазни сигнал $x_m(t)$ проузрокује → излазни сигнал $y_m(t)$;



У општем случају, сви континуални линеарни процеси унутар посматраних техничких система математички се могу описати линеарном диференцијалном једначином са константним коефицијентима, облика:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (4.2.4)$$

n, m – експоненти који дефинишу ред диференцијалне једначине;
 $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, a_n, b_0, b_1, \dots, b_{m-1}, b_m$ – константни коефицијенти.

У случају математичког модела приказаног једначином (4.1.11), једначина (4.2.4) постала би диференцијална једначина првога реда ($n=1; m=0$) са константним коефицијентима ($a_1 \equiv T_V \equiv \text{const}; a_0 \equiv 1 - K\tau; b_0 \equiv K_P \equiv \text{const}$) и попримила би облик:

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (4.2.5)$$

Опште решење диференцијалне једначине (4.2.5), односно (4.1.11) представља одзив система (платформе) на улазну побуду, при чему се јасно уочавају два међусобно различита стања система:

- *нестационарно-прелазно стање система* – то је део одзива који тежи нули када независно променљива тј. време тежи бесконачном ($t \rightarrow \infty$), а карактерише се тзв. "временом одзива платформе" (t_{op}). Ово време одзива представља брзину смиривања платформе услед улазног поремећаја, тј. исто представља дужину трајања прелазног процеса;

- *стационарно стање система* – то је део одзива који након завршетка прелазног процеса не тежи нули када независно променљива тј. време тежи бесконачном ($t \rightarrow \infty$), већ некој константној унапред задатој вредности $y(t) = \text{const}$, која се у теорији система назива и сигналом нулте учестаности (сигнал једносмерне струје). Сигнал једносмерне струје, тј. стационарни одзив платформе која врши сепарацију влажне земљишне масе може се одредити на основу теореме граничне вредности дате у оквиру ПРИЛОГА П1 (случај под редним бројем 35) са Лапласовим трансформацијама:

$$f(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot F(p) \quad (4.2.6)$$

p – комплексна променљива помоћу које се изводе Лапласова и инверзна Лапласова трансформација.

Овде је посебно битно истаћи чињеницу да време одзива платформе t_{op} које карактерише брзину смиривања поремећеног кретања не зависи од врсте поремећаја, већ само од конструкцијских параметара платформе. У зависности од дужине трајања овог "смиривања" платформе након било којег намерно или случајно изазваног поремећаја, у пракси су могућа два карактеристична случаја:

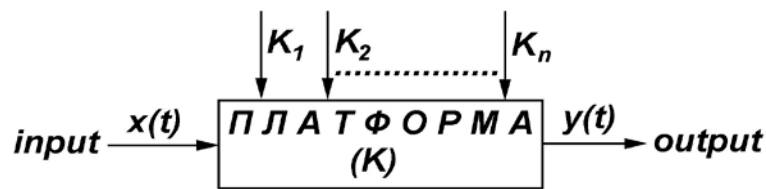
→ I случај: ако је $t_{op} > t_{rp}$ → корекција по отвореном систему; (4.2.7)

→ II случај: ако је $t_{op} < t_{rp}$ → корекција по затвореној повратној спрези; (4.2.8)

t_{rp} – време реакције платформе (минимално потребно време да би се променио режим рада платформе, променом једног или више радних параметара).

Услед дејства различитих поремећајних фактора из окружења (поремећајних сила и момената, неповољног састава земљишта, високе влажности и слично) настаје *разлика* између улазне величине тј. количине влажне земље дотурене на платформу (Q_1) и излазне величине тј. стварне количине влажне земље просејане кроз решетку платформе (Q_2). Насталу разлику неопходно је на неки технички могући начин кориговати.

У првом случају, ако време одзива платформе t_{op} релативно дуго траје (споро смиривање након поремећаја) и ако је исто дуже од времена реакције платформе t_{rp} , платформа не може примати сигнал излазне величине, већ ће извршавати управљачка дејства по унапред утврђеном програму. Ово би била корекција по *отвореном систему*, где и сама корекција може представљати нов поремећај, чиме се просејавање влажне земље још више отежава (сл. 16).



Сл. 16. Структурна шема отвореног система О-П-РП (окружење-платформа-радни параметри)

Ознаке приказане на слици 16 имају следеће значење:

$x(t)$ – улазна величина (*input*), која замењује дејство окружења на посматрани систем (независно променљива величина);

$y(t)$ – излазна величина (*output*), која замењује дејство система на окружење (зависно променљива величина);

K – оператор трансформације, у коме су садржане све елементарне операције (K_1, K_2, \dots, K_n) које се врше над улазном величином $x(t)$ да би се добила излазна величина $y(t)$.

У другом случају, ако је време одзива платформе t_{op} релативно кратко (брзо смиривање након поремећаја) и ако је исто краће од времена реакције платформе t_{rp} , онда је путем повратне спреге могуће пренети сигнал излазне величине управљачком систему платформе, како би се променом режима њеног рада просејавање влажне земље поново приближило жељеној (унапред задатој) вредности. Ово би била типична корекција по *затвореној повратној спрези* (сл. 17).



Сл. 17. Структурна шема затвореног система О-П-РП (окружење-платформа-радни параметри)

Из свега што је до сада изложено може се закључити следеће [27]:

- при свим врстама поремећаја (било из окружења или услед реакција саме платформе) потребно је да се рад платформе што брже смирује и да тежи ка неком устаљеном радном режиму;

- пожељно је да време одзива платформе, а такође и време реакције платформе буде што мање (што краће трајање), да би се постигла већа сигурност и поузданост у раду, тј. да би платформа могла у реалном времену да "прати" све новонастале околности;

- потребно је, после смиривања тј. након завршетка прелазног процеса, да платформа буде у режиму рада који је што ближи жељеном-задатом радном режиму просејавања влажне земљишне масе.

Тек након испуњења сва три наведена захтева може се рећи да се рад осцилаторне транспортне платформе одвија на жељени начин, односно да је избор радних параметара такав да омогућује стабилан рад платформе посматран са аспекта сепарације и просејавања влажне земљишне масе.

4.3. АНАЛИЗА ДИНАМИЧКОГ ПОНАШАЊА ОСЦИЛАТОРНЕ ТРАНСПОРТНЕ ПЛАТФОРМЕ У ТОКУ СЕПАРАЦИЈЕ И ПРОСЕЈАВАЊА ВЛАЖНЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ

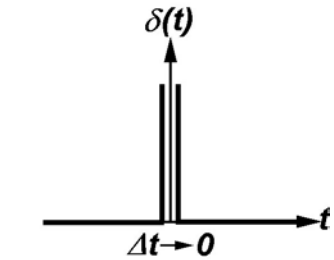
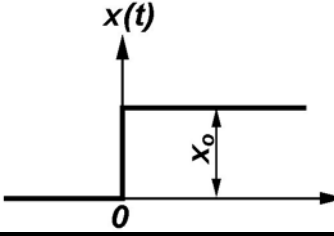
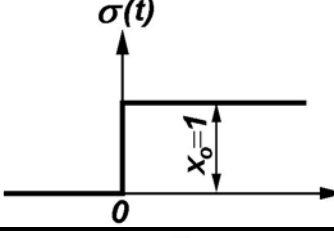
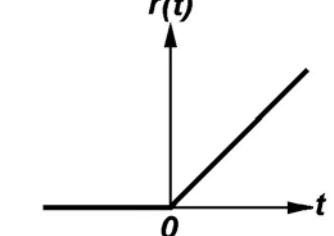
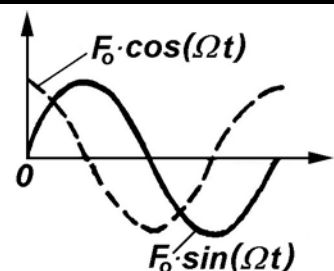
За идентификацију динамичког понашања платформе која врши сепарацију и просејавање влажне земљишне масе биће коришћена метода активног експеримента, тј. *метода одзива система на познату побудну (тест) функцију*. Код ове методе као улазна величина користи се нека унапред позната поремећајна функција (табела Т.4.1), а о понашању читавог система закључује се на основу одзива, тј. на основу добијене излазне величине из система.

Постоји релативно велики број поремећајних тест-функција тј. апликативних улазних величина, али су у пракси далеко највећу примену нашле следеће тест-функције [28]:

- 1) Јединична импулсна $\delta(t)$ функција (Диракова функција);
- 2) Одскачна $x(t)=x_0(t)$ функција;
- 3) Јединична одскачна $\sigma(t)$ функција;
- 4) Нагибна $r(t)$ функција;
- 5) Хармонијска функција [$F_0\sin(\Omega t)$, или $F_0\cos(\Omega t)$].

У оквиру ове тачке биће размотрен случај побуде када на улазу у систем делује одскачна $x_0(t)$ функција, док ће случај побуде уз помоћ хармонијске функције бити анализиран у посебној тачки у оквиру методе фреквентног одзива система О-П-РП.

Табела Т.4.1. Поремећајне тест-функције

Редни број	Назив функције	Ознака функције	Дефиниција функције	График функције
1.	Јединична импулсна (Диракова) функција	$\delta(t)$	$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{за } t < 0 \\ \infty, & \text{за } t = 0 \\ 0, & \text{за } t > 0 \end{cases}$	
2.	Одскачна функција	$x_0(t)$	$x(t) = \begin{cases} 0, & \text{за } t < 0 \\ x_0, & \text{за } t \geq 0 \end{cases}$	
3.	Јединична одскачна функција	$\sigma(t)$	$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & \text{за } t < 0 \\ 1, & \text{за } t \geq 0 \end{cases}$	
4.	Нагибна функција	$r(t)$	$r(t) = \int_0^t \sigma(t) dt = t$	
5.	Хармонијска функција	$F_0 \sin(\Omega t)$ или: $F_0 \cos(\Omega t)$	$\tilde{x} = F_0 \cdot e^{j\varphi}$ \tilde{x} – фазор дат у комплексном облику	

4.3.1. Тестирање система О-П-РП помоћу одскачне $x_0(t)$ функције

За ову анализу потребно је најпре решити диференцијалну једначину (4.1.11), при чему добијено решење представља одзив проучаваног система на побудну одскачну $x_0(t)$ функцију. У општем случају, опште решење линеарне диференцијалне једначине са константним коефицијентима састоји се из два засебна дела и то:

• *хомогеног решења* $y_h(t)$ које зависи само од конструкцијско-експлоатационих карактеристика система (платформе), а не зависи од типа примењеног улазног тј. побудног сигнала $x(t)$. Зато ово решење са аспекта теорије управљања представља *слободни одзив система*.

• *партикуларног решења* $y_p(t)$ које зависи од типа примењеног улазног тј. побудног сигнала $x(t)$ и које заједно са свим својим коефицијентима задовољава полазну једначину, тј. проучавани математички модел. Са аспекта теорије управљања ово решење представља *принудни одзив система*.

Нека на улазу у проучавани систем О-П-РП делује улазни побудни сигнал, тј. одскачна функција $x_0(t)$ која је дефинисана следећим изразом (Т.4.1/ред. бр. 2):

$$x(t) = \begin{cases} 0, & \text{за } t < 0 \\ x_0, & \text{за } t \geq 0 \end{cases}$$

Под дејством овог улазног сигнала на излазу из система појављује се излазни сигнал $y(t)$ који "касни" у односу на улазни сигнал за вредност времена кашњења τ , при чему се излазни сигнал (сл. 18) дефинише изразом:

$$y(t) = \begin{cases} 0, & \text{за } t < \tau \\ h(t), & \text{за } t \geq \tau \end{cases}$$

$h(t)$ – функција прелазне (временске) карактеристике.

Хомогено решење добија се као решење које задовољава леву страну диференцијалне једначине (4.1.11), када се иста изједначи са нулом:

$$T_V \frac{dy(t)}{dt} + (1 - K_\tau)y(t) = 0 \tag{4.3.1.1}$$

Применом оператора диференцирања ($p = \frac{d}{dt}$) на диференцијалну једначину (4.3.1.1) добија се карактеристична хомогена једначина система у временском домену:

$$T_V \cdot p \cdot y(t) + (1 - K_\tau)y(t) = 0$$

$$y(t)[T_V \cdot p + (1 - K_\tau)] = 0 \quad / : y(t)$$

$$T_V \cdot p + 1 - K_\tau = 0 \quad (\text{за } t \geq \tau, \text{ јер би за } t < \tau \text{ увек било } y(t)=0)$$

$$T_V \cdot p = K_\tau - 1$$

$$p = \frac{K_\tau - 1}{T_V} \tag{4.3.1.2}$$

Знајући да се у општем случају хомогено решење састоји од чланова облика Ae^{pt} (чланова има онолико колики је ред диференцијалне једначине) може се писати:

$$y_h(t) = Ae^{pt}$$

$$y_h(t) = Ae^{\left(\frac{K_\tau - 1}{T_V}\right)t} \tag{4.3.1.3}$$

A – константа система која се одређује из задатих почетних услова.

Партикуларно решење зависи од типа улазног сигнала и за диференцијалну једначину n -тог реда уобичајени облик партикуларног решења гласи:

$$y_p(t) = C_1 \cdot t^n + C_2 \cdot t^{n-1} + \dots + C_n \cdot t + C_{n+1} \quad (4.3.1.4)$$

$C_1, C_2, \dots, C_n, C_{n+1}$ - временске константе којих има увек за једну више у односу на ред диференцијалне једначине.

$$y_p(t) = C_1 \cdot t + C_2 \quad (4.3.1.5)$$

$$\frac{dy_p(t)}{dt} = C_1 \quad (4.3.1.6)$$

Сменом (4.3.1.5) и (4.3.1.6) у математички модел (4.1.11) добија се:

$$T_V \cdot C_1 + (1 - K_\tau)(C_1 \cdot t + C_2) = K_P \cdot x_0(t - \tau),$$

јер је према слици 27 очигледно да је $x(t - \tau) = x_0(t - \tau)$.

$$T_V \cdot C_1 + C_1 \cdot t + C_2 - C_1 \cdot K_\tau \cdot t - C_2 \cdot K_\tau = K_P \cdot x_0(t - \tau)$$

$$(C_1 - C_1 \cdot K_\tau)t + (C_1 \cdot T_V + C_2 - C_2 \cdot K_\tau) = K_P \cdot x_0(t - \tau) \quad (4.3.1.7)$$

Применом методе идентитета (упоређивањем коефицијената који стоје уз одговарајућу променљиву) на леву и десну страну једначине (4.3.1.7) уочавају се следеће идентичке једнакости:

$$C_1 - C_1 \cdot K_\tau = 0 \Rightarrow C_1(1 - K_\tau) = 0 \Leftrightarrow C_1 = 0 \vee K_\tau = 1$$

- **Напомена:** Случај $K_\tau = 1$ могућ је математички али не и физички, јер би тада дошло до потпуног престанка рада платформе, па би дати математички модел тада представљао чисту математичку апстракцију. Зато се споменути случај даље неће ни анализирати.

$$C_1 \cdot T_V + C_2 - C_2 \cdot K_\tau = K_P \cdot x_0(t - \tau)$$

$$C_2(1 - K_\tau) = K_P \cdot x_0(t - \tau) - C_1 \cdot T_V$$

$$C_2 = \frac{K_P \cdot x_0(t - \tau)}{1 - K_\tau}$$

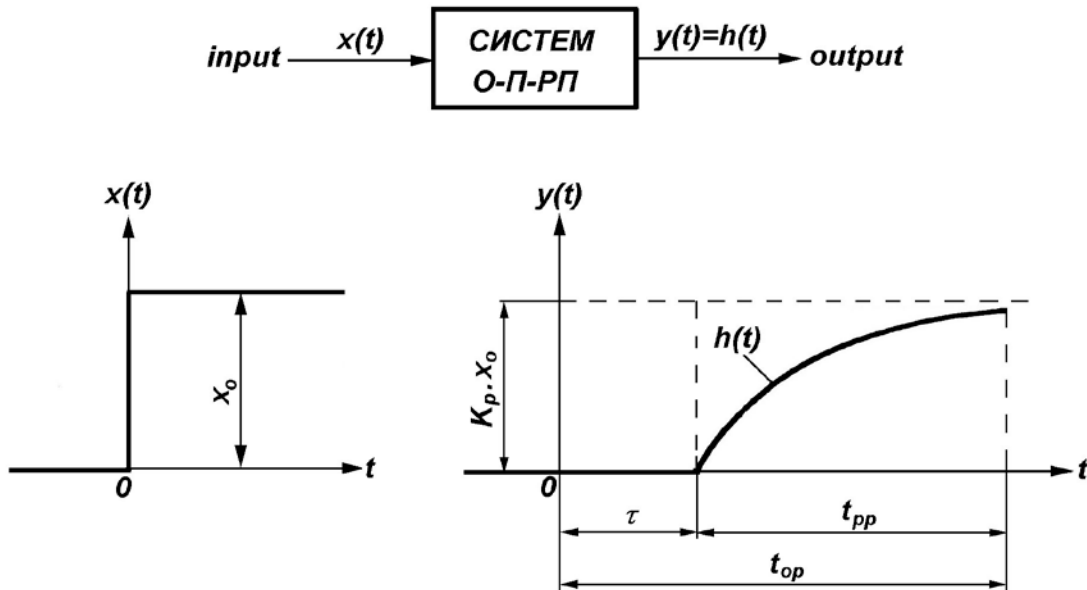
Сменом срачунатих вредности константи C_1 и C_2 у (4.3.1.5) добија се тражено партикуларно решење:

$$y_p(t) = 0 \cdot t + \frac{K_P \cdot x_0(t - \tau)}{1 - K_\tau} = \frac{K_P \cdot x_0(t - \tau)}{1 - K_\tau} \quad (4.3.1.8)$$

Опште решење диференцијалне једначине која представља математички модел проучаваног система добија се као збир хомогеног и партикуларног решења:

$$y(t) = Ae^{\left(\frac{K_\tau - 1}{T_V}\right)t} + \frac{K_P \cdot x_0(t - \tau)}{1 - K_\tau} \quad (4.3.1.9)$$

Графичка интерпретација свих претходних разматрања дата је на слици 18. Са слике се запажа да излазни сигнал $y(t)$ почиње да се генерише тек након одређеног времена τ , које представља време његовог кашњења у односу на побудни улазни сигнал. Зато се за проучавани систем О-П-РП може рећи да се понаша као типичан апериодични елемент првога реда са кашњењем, чије су особине и динамичко понашање добро познати из теорије линеарних система [27].



Сл. 18. Одзив осцилаторне транспортне платформе која врши сепарацију влажне земљишне масе на поремећај изазван одскачком побудном функцијом (τ -време кашњења излазног сигнала у односу на улазни сигнал; t_{pp} -дужина трајања прелазног процеса; t_{op} -време одзива платформе)

Са слике се такође запажа да одскачни одзив $y(t)$ платформе која врши сепарацију влажне земљишне масе ни након истека времена кашњења τ не постиже тренутно задату вредност $K_p \cdot x_0$, већ јој се постепено–асимптотски приближава. Теоријски, задата вредност $K_p \cdot x_0$ била би постигнута тек после бесконачног времена, што указује на чињеницу да платформа поседује одређену несавршеност-инертност, а мера те инертности јесте временска константа T_V . Уколико временска константа има већу вредност, утолико је већа и инертност саме платформе у току процеса сепарације.

Сматра се да је прелазни процес завршен онда када функција прелазне карактеристике $h(t)$ достигне вредност $h(t)=y(t) \approx 0,95 \cdot K_p \cdot x_0$ (што приближно износи $t \approx 3 \cdot T_V$), јер се тада успоставља ново равнотежно стање система О-П-РП.

4.3.2. Преносна функција система О-П-РП

Преносна функција представља једно од најважнијих обележја сваког изучаваног система, јер се на основу ње могу донети многи важни закључци о динамичким карактеристикама, као и о стабилности читавог система за време обављања радне функције. Такође, на основу ње могуће је извршити и комплетну фреквентну анализу посматраног система.

Преносна функција дефинише се као однос Лапласове трансформације излазне величине и Лапласове трансформације улазне величине система (однос L-одзива и L-побуде система):

$$\text{преносна функција } G(p) = \frac{L\text{-трансформација одзива}}{L\text{-трансформација побуде}} = \frac{Y(p)}{X(p)} \quad (4.3.2.1)$$

уз две основне претпоставке:

→ за $t < 0$ улазни сигнал $x(t)$ и излазни сигнал $y(t)$ не егзистирају;

→ за $t = 0$ сви почетни услови једнаки су нули.

На основу (4.3.2.1) одговарајући одзив система у равни комплексне променљиве $p = c + j\omega$ ће гласити:

$$Y(p) = G(p) \cdot X(p) \quad (4.3.2.2)$$

Преносна функција система О-П-РП добија се тако што се изврши Лапласова трансформација леве и десне стране једначине (4.1.11) која представља математички модел проучаваног система (ПРИЛОГ П1 у оквиру главе 9):

$$L\left[T_V \frac{dy(t)}{dt} + (1 - K_\tau)y(t)\right] = L[K_P \cdot x(t - \tau)]$$

$$T_V [p \cdot Y(p) - Y(0^+)] + (1 - K_\tau)Y(p) = K_P \cdot X(p) \cdot e^{-\tau p}$$

$$T_V \cdot p \cdot Y(p) + (1 - K_\tau)Y(p) = K_P \cdot X(p) \cdot e^{-\tau p}$$

$$Y(p) [T_V \cdot p + 1 - K_\tau] = K_P \cdot X(p) \cdot e^{-\tau p} \quad / : X(p)$$

$$\frac{Y(p)}{X(p)} [T_V \cdot p + 1 - K_\tau] = K_P \cdot e^{-\tau p}$$

$$G(p) = \frac{K_P}{T_V \cdot p + 1 - K_\tau} e^{-\tau p} \quad (4.3.2.3)$$

$e^{-\tau p}$ – оператор кашњења излазног сигнала у односу на улазни сигнал (због лепљења влажне земље за решетку платформе).

У општем случају, преносну функцију система могуће је приказати и у виду разломка, уз потребан услов да бројилац и именилац немају заједничких корена (решења):

$$G(p) = \frac{M(p)}{N(p)} \quad (4.3.2.4)$$

$M(p)$ – полином од "p" бројиоца;

$N(p)$ – полином од "p" имениоца.

Овакав облик приказивања преносне функције омогућује да јој се релативно брзо одреде нуле и полови, а све у циљу графичког представљања исте у равни комплексне променљиве $p = c + j\omega$.

• Нуле преносне функције $G(p)$:

Када се бројилац у (4.3.2.4) изједначи са нулом, добија се:

$$G(p) = 0, \text{ за } M(p) = 0.$$

У том случају тачке z_i ($i=1, 2, \dots, n$) у којима преносна функција $G(p)$ узима вредност нула представљају нуле преносне функције. У случају преносне функције (4.3.2.3) добија се:

$$G(p) = 0, \text{ за } K_p \cdot e^{-\tau p} = 0 \Leftrightarrow K_p = 0 \vee e^{-\tau p} = 0$$

Међутим, како су увек и фактор појачања система K_p и оператор кашњења $e^{-\tau p}$ различити од нуле, долази се до закључка да никада не може бити испуњен услов $G(p)=0$, што значи да преносна функција система О-П-РП нема нула у равни комплексне променљиве $p=c+j\omega$.

• Полови преносне функције $G(p)$:

Када се именилац у (4.3.2.4) изједначи са нулом и реши по " p ", добија се:

$$N(p) = 0$$

У том случају тачке p_i ($i=1, 2, \dots, n$) у којима именилац узима вредност нула представљају полове преносне функције. У случају (4.3.2.3) добија се:

$$N(p) = T_v \cdot p + 1 - K_\tau = 0$$

$$T_v \cdot p = K_\tau - 1$$

$$p = \frac{K_\tau - 1}{T_v} \quad (4.3.2.5)$$

И у овом случају важи већ изречена констатација да је случај $K_\tau=1$, $p=0$, могућ математички али не и физички, па се из већ образложеног разлога исти неће узети у разматрање. Оператор кашњења који фигурише у једначини (4.3.2.3) ће у случају анализираних система О-П-РП имати следећу вредност:

$$e^{-\tau p} = e^{-\tau \left(\frac{K_\tau - 1}{T_v} \right)} = e^{\left(\frac{1 - K_\tau}{T_v} \right) \tau} \quad (4.3.2.6)$$

• "ПН-дијаграм" система О-П-РП:

И нуле и полове преносне функције $G(p)$ могу се приказати графички на истом дијаграму у равни комплексне променљиве $p=c+j\omega$, чиме се добија пол-нула дијаграм који даје добру прегледност и омогућује знатно лакшу анализу при проучавању динамичког понашања сваког конкретних система (сл. 19).



Сл. 19. ПН-дијаграм осцилаторне транспортне платформе која врши сепарацију влажне земљишне масе

• Класификација основних динамичких елемената:

Када у диференцијалној једначини која представља математички модел проучаване појаве или процеса фигурише само једна независно променљива $x(t)$ која у потпуности описује динамичко понашање система, у том случају реч је о елементарном систему који се у литератури често назива и основни динамички елемент. Класификацију основних динамичких елемената могуће је извршити како на основу типа диференцијалне једначине математичког модела, тако и на основу типа преносне функције. Сходно томе, могуће је разликовати пет главних типова основних динамичких елемената [28]:

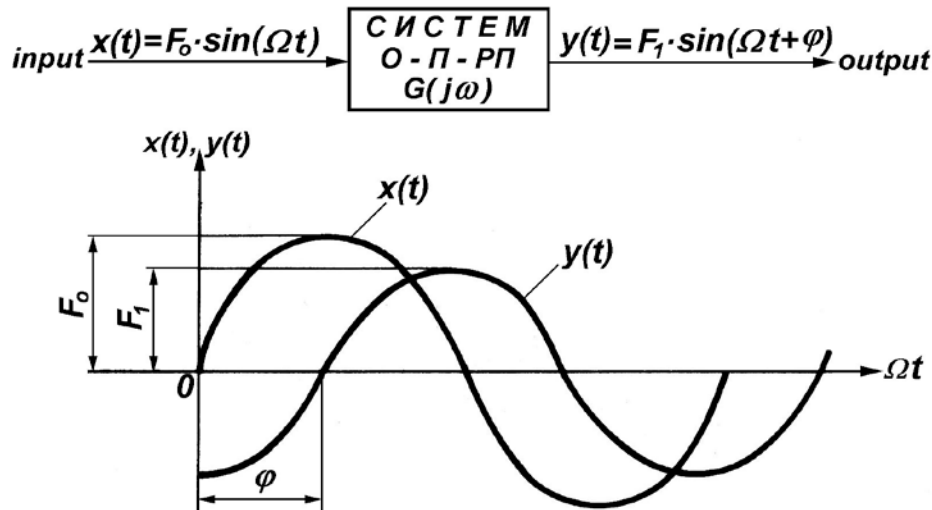
- *пропорционални елемент* ("П" – елемент) – то је линеарни елемент чија преносна функција нема ниједан пол нити нулу у координатном почетку комплексне " p "– равни;
- *елемент диференцирања* ("Д" – елемент) – линеарни елемент чија преносна функција има једну нулу у координатном почетку комплексне " p "– равни;
- *елемент интегрирања* ("И" – елемент) – такође линеарни елемент чија преносна функција има један пол у координатном почетку комплексне " p "– равни;
- *елемент кашњења* – линеарни елемент чија преносна функција садржи у себи величину " τ " која представља време кашњења излазног сигнала у односу на улазни сигнал;
- *комбиновани елемент* – као што му и само име каже исти представља комбинацију два или више претходно наведена линеарна елемента.

На основу изложеног, очигледно је да преносна функција нашег проучаваног система О-П-РП нема ниједан пол нити нулу у координатном почетку комплексне " p "– равни и зато представља пропорционални "П"- елемент, али у исто време и елемент кашњења, јер у (4.3.2.3) фигурише време кашњења τ . То значи да је у питању је комбиновани елемент за који је већ истакнуто да у литератури носи назив апериодични елемент првога реда са кашњењем.

4.3.3. Тестирање система О-П-РП помоћу методе фреквентног одзива

Ако се код комплексне променљиве $p=c+j\omega$ стави да је: $c=0$, добија се тзв. комплексна учестаност $p=j\omega$, па је у том случају могуће извршити анализу проучаваног система у домену учестаности уместо у домену комплексне променљиве. Такав поступак анализе познат је под именом метод фреквентног одзива. Под фреквентним одзивом подразумева се стационарни одзив система на хармонијску побудну функцију (синусну или косинусну хармонијску тест-функцију).

Код ове врсте побуде карактеристично је то да улазни хармонијски сигнал проузрокује излазни такође хармонијски сигнал и то са учестаношћу улазног сигнала (принудне осцилације), али са амплитудом и фазом које се знатно разликују од амплитуде и фазе улазног сигнала. Математичка интерпретација претходне константације приказана је на слици 20.



Сл. 20. Одзив осцилаторне транспортне платформе која врши сепарацију влажне земљишне масе на поремећај изазван хармонијском побудном функцијом

При раду са хармонијским функцијама могу се применити алгебарске методе, јер важи следећа основна теорема:

"Алгебарски збир било колико хармонијских функција истих угаоних учестаности Ω и било ког броја и реда њених извода, остаје и даље хармонијска функција исте угаоне учестаности Ω ".

Претходна теорема упућује на чињеницу да се улазни и излазни хармонијски сигнал могу приказати у следећем облику:

$$\rightarrow \text{улазни хармонијски сигнал: } x(t) = F_0 \cdot \sin(\Omega t) \quad (4.3.3.1)$$

$$\rightarrow \text{излазни хармонијски сигнал: } y(t) = F_1 \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \quad (4.3.3.2)$$

F_0 – амплитуда осциловања улазног сигнала;

F_1 – амплитуда осциловања излазног сигнала;

Ω – кружна фреквенција-учестаност осциловања спољашње поремећајне силе.

• Карактеристика учестаности система О-П-РП:

Да би се одредила карактеристика учестаности посматраног система, потребно је најпре да се одреди преносна функција система на хармонијски (синусни) побудни сигнал дат једначином (4.3.3.1). И у овом случају полази се од математичког модела датог једначином (4.1.11), уз напомену да су сви почетни услови једнаки нули (за $t=0 \Rightarrow y(0)=0, y'(0)=0$).

$$T_V \frac{dy(t)}{dt} + (1 - K_\tau)y(t) = K_P \cdot F_0 \cdot \sin \Omega(t - \tau)$$

$$L \left[T_V \frac{dy(t)}{dt} + (1 - K_\tau)y(t) \right] = K_P \cdot L[F_0 \cdot \sin \Omega(t - \tau)]$$

$$T_V [p \cdot Y(p) - Y(0^+)] + (1 - K_\tau) \cdot Y(p) = K_P \frac{F_0 \cdot \Omega}{p^2 + \Omega^2} e^{-p\tau}$$

$$\begin{aligned}
 Y(p)[T_V \cdot p + 1 - K_\tau] &= \frac{K_P \cdot F_0 \cdot \Omega \cdot e^{-\tau p}}{p^2 + \Omega^2} \\
 Y(p) &= \frac{K_P \cdot F_0 \cdot \Omega \cdot e^{-\tau p}}{T_V \cdot p + 1 - K_\tau} = \frac{K_P \cdot F_0 \cdot \Omega \cdot e^{-\tau p}}{(p^2 + \Omega^2) \cdot (T_V \cdot p + 1 - K_\tau)} \\
 G(p) &= \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{\frac{K_P \cdot F_0 \cdot \Omega \cdot e^{-\tau p}}{(p^2 + \Omega^2) \cdot (T_V \cdot p + 1 - K_\tau)}}{\frac{F_0 \cdot \Omega}{p^2 + \Omega^2}} \\
 G(p) &= \frac{K_P}{T_V \cdot p + 1 - K_\tau} e^{-\tau p} \tag{4.3.3.3}
 \end{aligned}$$

Ако се из домена комплексне променљиве $p=c+j\omega$ пређе у домен комплексне учестаности $p=j\omega$ (стављајући да је $c=0$), на основу једначине (4.3.2.6) и на основу преносне функције $G(p)$ долази се до карактеристике учестаности $G(j\omega)$, која на тај начин представља преносну функцију посматраног система на хармонијску (синусну) побуду:

$$G(j\omega) = \frac{K_P}{T_V \cdot j\omega + 1 - K_\tau} e^{\left(\frac{1-K_\tau}{T_V}\right)\tau} \tag{4.3.3.4}$$

Ако се улазном сигналу $x(t)$ мења учестаност осциловања Ω задржавајући при томе амплитуду осциловања на константном нивоу ($F_0=\text{const}$), на излазу из система добија се излазни сигнал $y(t)$ који ће, за сваку нову вредност побудне фреквенције Ω , имати тачно одређену вредност амплитуде F_1 и тачно одређену вредност фазног померања φ у односу на улазни-побудни сигнал:

$$F_1 = F_1(\Omega); \quad \varphi = \varphi(\Omega) \tag{4.3.3.5}$$

$$\frac{F_1}{F_0} = M(\Omega) \tag{4.3.3.6}$$

$M(\Omega)$ - фактор појачања система О-П-РП (његова зависност од односа амплитуда излазног и улазног хармонијског сигнала представља амплитудно-фреквентну карактеристику проучаваног система);

$\varphi(\Omega)$ - фазна помереност излазног у односу на улазни хармонијски сигнал (зависност ове померености од Ω представља фазно-фреквентну карактеристику проучаваног система);

• Амплитудно-фреквентна карактеристика система О-П-РП:

Иста се одређује на основу карактеристике учестаности (4.3.3.4) и то као одговарајућа апсолутна вредност карактеристике учестаности, према обрасцу:

$$|G(j\omega)| = M(\omega) = \sqrt{R_e^2[G(j\omega)] + I_m^2[G(j\omega)]} \tag{4.3.3.7}$$

На основу једначина (4.3.3.4) и (4.3.3.7) добија се:

$$G(j\omega) = \frac{K_P \cdot e^{\left(\frac{1-K\tau}{T_V}\right)\tau} \cdot (1-K_\tau) - T_V \cdot \omega \cdot j}{(1-K_\tau) + T_V \cdot \omega \cdot j} \cdot \frac{(1-K_\tau) - T_V \cdot \omega \cdot j}{(1-K_\tau) - T_V \cdot \omega \cdot j}$$

$$G(j\omega) = \frac{K_P \cdot e^{\left(\frac{1-K\tau}{T_V}\right)\tau} \cdot (1-K_\tau) - K_P \cdot e^{\left(\frac{1-K\tau}{T_V}\right)\tau} \cdot T_V \cdot \omega \cdot j}{(1-K_\tau)^2 + T_V^2 \cdot \omega^2}$$

$$R_e[G(j\omega)] = \frac{K_P \cdot e^{\left(\frac{1-K\tau}{T_V}\right)\tau} \cdot (1-K_\tau)}{(1-K_\tau)^2 + T_V^2 \cdot \omega^2} \quad (4.3.3.8)$$

$$I_m[G(j\omega)] = -\frac{K_P \cdot e^{\left(\frac{1-K\tau}{T_V}\right)\tau} \cdot T_V \cdot \omega}{(1-K_\tau)^2 + T_V^2 \cdot \omega^2} \quad (4.3.3.9)$$

$$|G(j\omega)| = M(\omega) = \sqrt{\frac{K_P^2 \cdot e^{2\left(\frac{1-K\tau}{T_V}\right)\tau} \cdot (1-K_\tau)^2 + K_P^2 \cdot e^{2\left(\frac{1-K\tau}{T_V}\right)\tau} \cdot T_V^2 \cdot \omega^2}{\left[(1-K_\tau)^2 + T_V^2 \cdot \omega^2\right]^2}}$$

$$|G(j\omega)| = M(\omega) = \sqrt{\frac{K_P^2 \cdot e^{2\left(\frac{1-K\tau}{T_V}\right)\tau} \left[(1-K_\tau)^2 + T_V^2 \cdot \omega^2\right]}{\left[(1-K_\tau)^2 + T_V^2 \cdot \omega^2\right]^2}}$$

$$|G(j\omega)| = M(\omega) = \frac{K_P \cdot e^{\left(\frac{1-K\tau}{T_V}\right)\tau}}{\sqrt{(1-K_\tau)^2 + T_V^2 \cdot \omega^2}} \quad (4.3.3.10)$$

Једначина (4.3.3.10) представља амплитудно-фреквентну карактеристику, односно фактор појачања система О-П-РП.

• **Фазно-фреквентна карактеристика система О-П-РП:**

Као и у случају амплитудно-фреквентне карактеристике и фазно-фреквентна карактеристика одређује се на основу карактеристике учестаности $G(j\omega)$, односно на основу њеног реалног и имагинарног дела датих једначинама (4.3.3.8) и (4.3.3.9):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_m[G(j\omega)]}{R_e[G(j\omega)]} \quad (4.3.3.11)$$

$$tg \varphi = \frac{-\frac{K_p \cdot e^{\left(\frac{1-K\tau}{T_v}\right)\tau} \cdot T_v \cdot \omega}{(1-K\tau)^2 + T_v^2 \cdot \omega^2}}{\frac{K_p \cdot e^{\left(\frac{1-K\tau}{T_v}\right)\tau} \cdot (1-K\tau)}{(1-K\tau)^2 + T_v^2 \cdot \omega^2}} = -\frac{T_v \cdot \omega}{1-K\tau}$$

$$\varphi = \arctg\left(-\frac{T_v \cdot \omega}{1-K\tau}\right) \quad (4.3.3.12)$$

Једначина (4.3.3.12) представља фазно-фреквентну карактеристику, односно карактеристику кашњења излазног хармонијског сигнала у односу на улазни хармонијски сигнал система О-П-РП.

• Поларни дијаграм карактеристике учестаности система О-П-РП:

Ако се према једначини (4.3.3.8) срачунају реалне вредности карактеристике учестаности за разне вредности учестаности ω и исте нанесу на реалну осу поларног координатног система, а на имагинарну осу се нанесу имагинарне вредности срачунате према једначини (4.3.3.9), добијају се координате тачака које, када се међусобно споје, формирају криву познату под именом *поларни дијаграм карактеристике учестаности*. Овај дијаграм сликовито приказује резултате комплетне анализе система помоћу методе фреквентног одзива, па је у литератури познат и под именом *амплитудно-фазна фреквентна карактеристика система*.

Поступак конструисања поларног дијаграма карактеристике учестаности $G(j\omega)$ проучаваног система О-П-РП, био би следећи:

- Аналитичким путем према једначини (4.3.3.8) најпре треба срачунати реалне вредности $R_e [G(j\omega)]$ и према једначини (4.3.3.9) имагинарне вредности $I_m [G(j\omega)]$ за поједине-карактеристичне вредности побудних учестаности ω .
- Према једначини (4.3.3.7) срачунава се прва поларна координата-апсолутна вредност $|G(j\omega)|$, која код поларног дијаграма има улогу радијус-вектора.
- Према једначини (4.3.3.12) срачунава се друга поларна координата-фазно-фреквентна карактеристика $\varphi(\omega)$ и то за исте вредности ω које су коришћене у (4.3.3.7), при чему $\varphi(\omega)$ у поларном дијаграму има улогу поларног угла.
- Спајањем добијених карактеристичних тачака $T_i [|G(j\omega)|; \varphi(\omega)]$ добија се крива која у комплексној равни $p=c+j\omega$ дефинише карактеристику учестаности $G(j\omega)$ система О-П-РП, при чему треба имати у виду чињеницу да учестаност ω може варирати у интервалу од $[0 \dots \infty]$, односно:

$$0 \leq \omega \leq \infty \quad (4.3.3.13)$$

- Комплетан претходно описани поступак може се приказати и табеларно, што је и учињено у табели Т.4.2 за пет карактеристичних тачака, тј. карактеристичних вредности побудних учестаности ω . Ради лакшег и једноставнијег конструисања дијаграма, уведене су следеће претпоставке:

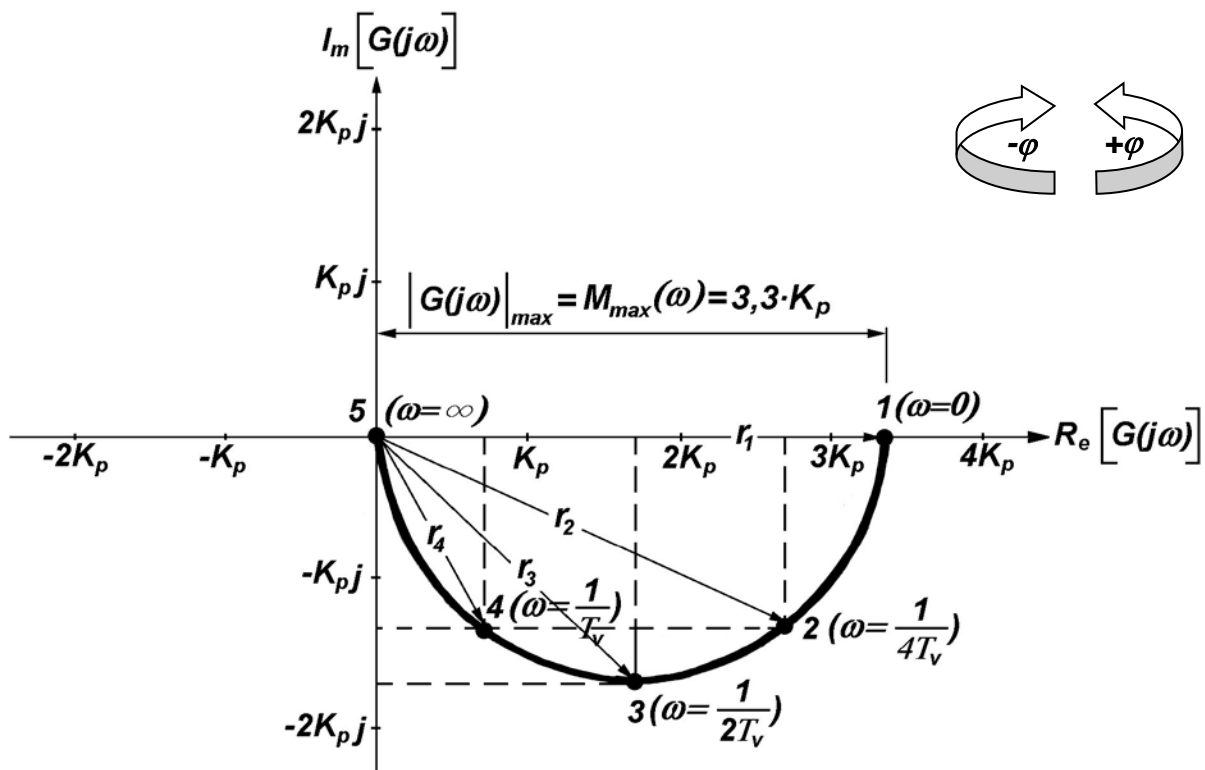
$t_{op} = 3T_V$ - време одзива платформе (укључујући и време кашњења τ);
 $\tau = T_V$ - време кашњења једнако је временској-инерционој константи система;
 $K_\tau = 0,5$ - коефицијент кашњења просејане земље у односу на дотурену земљу
 (јер се исти у стварности налази у опсегу $K_\tau=[0 \dots 1]$);

$$e^{\left(\frac{1-K_\tau}{T_V}\right)\tau} = e^{1-K_\tau} = e^{1-0,5} \approx 1,65 - \text{оператор кашњења система О-П-РП.}$$

Табела Т.4.2. Амплитудно-фазно-фреквентне карактеристике система О-П-РП за различите вредности побудних фреквенција ω

Каракт. тачка	ω	$R_e [G(j\omega)]$	$I_m [G(j\omega)]$	$ G(j\omega) = M(\omega)$	$\text{tg } \varphi = \frac{I_m [G(j\omega)]}{R_e [G(j\omega)]}$	$\varphi = \arctg \varphi$
1	0	$3,3K_p$	0	$3,3K_p$	0	0°
2	$\frac{1}{4T_V}$	$2,64K_p$	$-1,32K_p$	$2,95K_p$	-0,5	$-26,56^\circ$
3	$\frac{1}{2T_V}$	$1,65K_p$	$-1,65K_p$	$2,33K_p$	-1	-45°
4	$\frac{1}{T_V}$	$0,66K_p$	$-1,32K_p$	$1,48K_p$	-2	$-63,43^\circ$
5	∞	0	0	0	---	-90°

На основу табеле Т.4.2 може се конструисати поларни дијаграм карактеристике учестаности $G(j\omega)$, који је приказан на слици 21.



Сл. 21. Поларни дијаграм карактеристике учестаности $G(j\omega)$ осцилаторне транспортне платформе која врши сепарацију влажне земљишне масе

- Са поларног дијаграма може се уочити да проучавани систем О-П-РП има максимално појачање (однос амплитуда излазног и улазног хармонијског сигнала) од $3,3K_P$ за $\omega=0$, када такође нема ни фазног померања између улазног и излазног хармонијског сигнала ($\varphi=0^\circ$).
- Са даљим порастом учестаности ω појачање система непрестано се смањује, да би исто било једнако нули за $\omega \rightarrow \infty$. Тада је и фазно померање између улазног и излазног хармонијског сигнала максимално: $\varphi(\infty) = -(\pi/2) \text{ rad} = -90^\circ$, што одговара једној четвртини периода осциловања.
- За другачије одабране бројне вредности величина τ и K_τ добила би се друга вредност оператора кашњења система О-П-РП, па би тада и координате карактеристичних тачака биле различите, али би основни изглед поларног дијаграма остао непромењен, тј. увек би био идентичан изгледу приказаном на слици 30.

4.4. СТАБИЛНОСТ ОСЦИЛАТОРНЕ ТРАНСПОРТНЕ ПЛАТФОРМЕ У ТОКУ СЕПАРАЦИЈЕ И ПРОСЕЈАВАЊА ВЛАЖНЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ

4.4.1. Дефиниција стабилности система О-П-РП

У оквиру тачке 4.2 истакнуто је да услед дејства различитих поремећајних фактора из окружења (поремећајних сила и момената, неповољног састава земљишта, високе влажности и сл.) неминовно долази до поремећаја у раду осцилаторне транспортне платформе. Конкретно, поремећај у овом случају представља настала раз-лика између улазне величине тј. количине влажне земље дотурене на платформу (Q_1) и излазне величине тј. стварне количине влажне земље просејане кроз решетку плат-форме (Q_2). Да би и при овим неповољним околностима сепарација и просејавање влажне земље били у неким унапред задатим-референтним границама, потребно је да посматрани систем О-П-РП поседује задовољавајућу стабилност.

Под *општом стабилношћу* механичког система сматра се његова способност да, након престанка дејства било којег поремећаја, поново заузме референтни тј. жељени положај (дефиниција према Љапунову). То значи следеће: ако се платформа, било спољашњим било унутрашњим поремећајем изведе из свог референтног-стабилног положаја и уколико се по престанку дејства тих поремећаја брзо "враћа" у референтни положај, онда је њен рад СТАБИЛАН. У супротном, ако разлика између параметара Q_1 и Q_2 постаје све већа и већа и након престанка дејства поремећаја, онда је рад платформе НЕСТАБИЛАН, јер много одступа од жељене тј. очекиване разлике између дотурене и просејане количине влажне земље.

Поред претходне опште дефиниције стабилности, могуће је дефинисати и *стабилност управљања радом платформе* (тзв. "*управљивост платформе*"), што представља способност платформе да "држи" задате радне параметре у току дејства поремећаја. То практично значи следеће: платформа под дејством поремећаја одступа од задатих-референтних вредности, па количина непросејане влажне земље ($Q^*=Q_1-Q_2$) поприма неку тренутну вредност Q_t^* која одступа од референтне вредности Q^* . Након престанка дејства поремећаја могућа су два карактеристична случаја:

- I случај: Ако се вредности Q_t^* осцилаторно или асимптотски смањују и приближавају референтној вредности Q^* , платформом је и за време поремећаја могуће управљати, па се за такву платформу каже да има *стабилно управљање*.
- II случај: Ако се вредности Q_t^* осцилаторно или асимптотски повећавају и све више удаљавају од референтне вредности Q^* , платформом се за време поремећаја не може управљати, па се за такву платформу каже да има *нестабилно управљање*.

Пошто у нашем случају исти радни параметар (количина непросејане влажне земље Q^*) утиче и на општу стабилност и на управљивост платформе, из чисто практичних разлога та два сродна термина биће обједињена у један општи термин—*стабилност платформе*, па ће стога исти бити коришћен у даљем излагању наведене проблематике.

За проучавање стабилности техничких система од свих општеприхваћених тест-функција најприкладнија је *јединична импулсна (Диракова) $\delta(t)$ функција* (табела Т.4.1/редни бр. 1). При коришћењу $\delta(t)$ функције као поремећајне улазне функције проучавани систем биће увек стабилан ако излазна величина из система, тзв. *импулсни одзив система $g(t)$* тежи нули када време тежи бесконачности ($t \rightarrow \infty$). У том случају, импулсни одзив система одговара преносној функцији система $G(p)$, па се проучавање стабилности система може свести само на проучавање његове преносне функције.

Сходно једначини (4.3.2.4) преносну функцију могуће је приказати и као рационалну функцију у облику разломка $G(p)=M(p)/N(p)$, где су $M(p)$ и $N(p)$ полиноми од " p " бројиоца, односно имениоца респективно. Ако се полови наведене преносне функције у комплексној равни означе са: p_1, p_2, \dots, p_n , тада се преносна функција може написати као збир неколико парцијалних разломака:

$$G(p) = \frac{M(p)}{N(p)} = \frac{A_1}{p-p_1} + \frac{A_2}{p-p_2} + \dots + \frac{A_n}{p-p_n} \quad (4.4.1.1)$$

Ако се на једначину (4.4.1.1) примени инверзна Лапласова трансформација добија се на поремећајну $\delta(t)$ функцију у домену реалне временске променљиве (" t "-домен):

$$y(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} + \dots + A_n \cdot e^{p_n t} \quad (4.4.1.2)$$

A_1, A_2, \dots, A_n — константе које се одређују на основу почетних услова кретања методом идентитета и које не утичу на стабилност система.

Полови: p_1, p_2, \dots, p_n преносне функције $G(p)$ у општем случају су комплексни бројеви, па се о стабилности проучаваног система може донети закључак само на основу знака (позитивно / или негативно) реалних делова споменутих полова. При томе важи следеће:

→ Ако су у једначини (4.4.1.2) реални делови полова p_1, p_2, \dots, p_n негативни, са повећањем времена t смањује се вредност појединих парцијалних чланова у једначини, што значи да опада вредност функције одзива $y(t)$ која у том случају тежи нули [$y(t) \rightarrow 0$, ако $t \rightarrow \infty$].

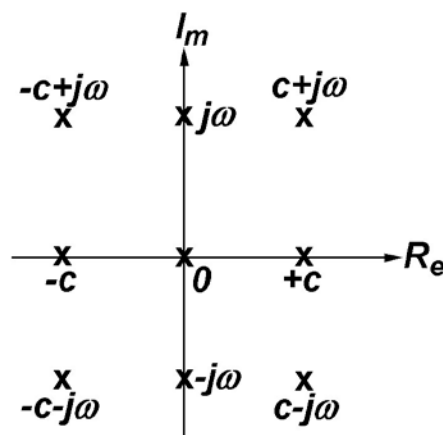
→ Ако су у једначини (4.4.1.2) реални делови полова p_1, p_2, \dots, p_n позитивни, са повећањем времена t увећава се вредност појединих парцијалних чланова у једначини, па се тада увећава вредност функције одзива $y(t)$ која се у том случају удаљава од нуле и тежи бесконачности [$y(t) \rightarrow \infty$, ако $t \rightarrow \infty$].

На основу претходна два става могуће је исказати важан закључак који представља ОПШТУ ТЕОРЕМУ О СТАБИЛНОСТИ МЕХАНИЧКИХ СИСТЕМА:

"Кретање било којег механичког система биће стабилно само онда када су реални делови полова: p_1, p_2, \dots, p_n преносне функције $G(p)$ система мањи од нуле (негативни)".

То у пракси значи да се утврђивање стабилности механичког система може свести само на утврђивање положаја полова преносне функције $G(p)$ у равни комплексне променљиве $p=c+j\omega$.

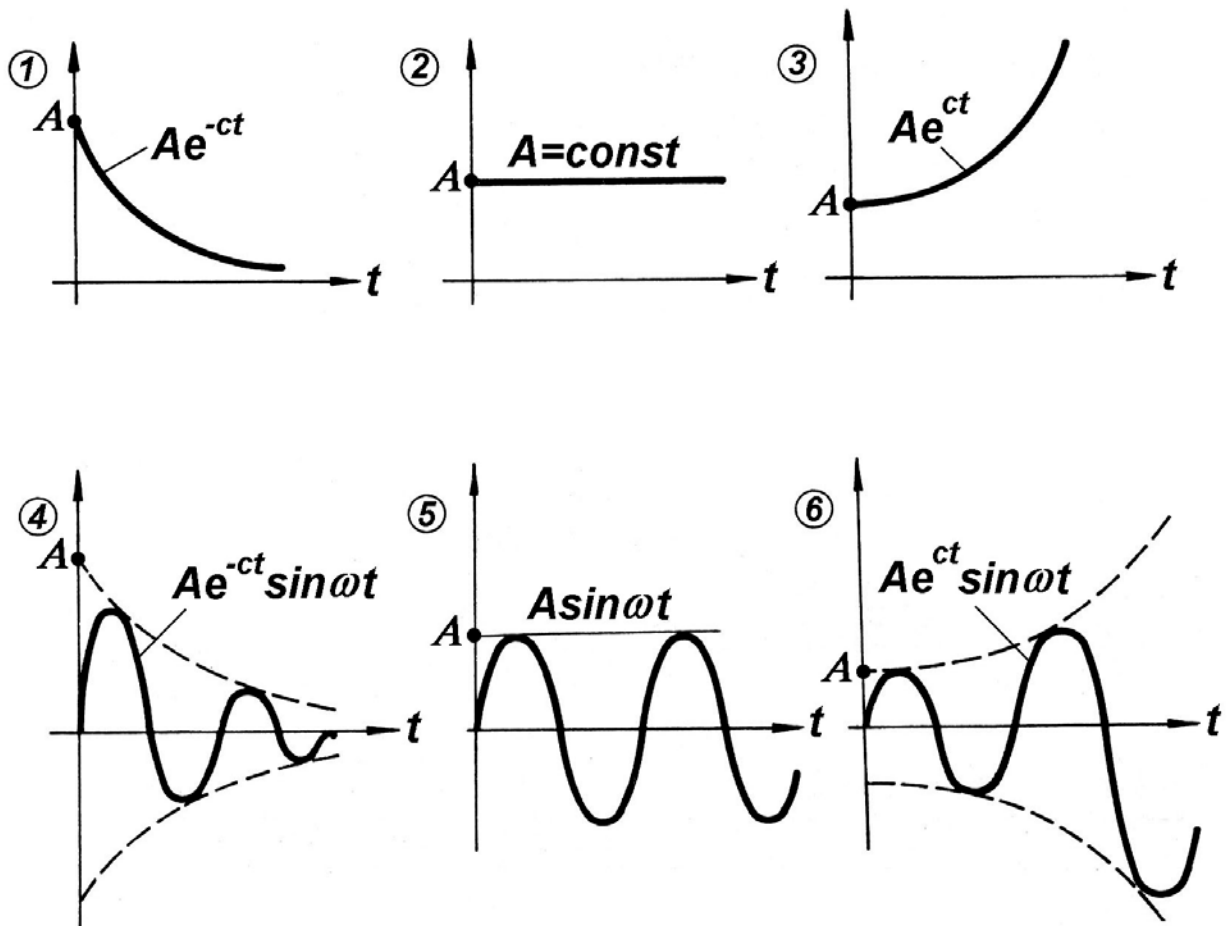
Све могуће варијанте положаја полова преносне функције $G(p)$ приказане су на слици 22, а сви могући одзиви са карактеристичним понашањем система дати су у табели Т.4.3 [28]. Графичка интерпретација табеле Т.4.3, односно њој припадајући карактеристични одзиви система, приказани су на слици 23.



Сл. 22. Могући положај полова преносне функције $G(p)$ у равни комплексне променљиве $p=c+j\omega$

Табела Т.4.3. Могући одзиви са карактеристичним понашањем система

Редни број	Пол	Одзив	Карактеристика понашања и стање система
1.	$-c$	$A \cdot e^{-ct}$	Пригушена експоненцијална функција; систем СТАБИЛАН
2.	0	A	Константа; Систем неутралан-СТАТИЧКИ СТАБИЛАН
3.	$+c$	$A \cdot e^{ct}$	Растућа експоненцијална функција; Систем НЕСТАБИЛАН
4.	$-c \pm j\omega$	$A \cdot e^{-ct} \sin(\omega t + \varphi)$	Експоненцијална пригушена синусоида; Систем СТАБИЛАН
5.	$\pm j\omega$	$A \sin(\omega t + \varphi)$	Синусоида константне амплитуде; Систем неутралан-УСЛОВНО СТАБИЛАН
6.	$c \pm j\omega$	$A \cdot e^{ct} \sin(\omega t + \varphi)$	Експоненцијална растућа синусоида; Систем НЕСТАБИЛАН



Сл. 23. Карактеристични одзиви система за могуће случајеве наведене у табели Т.4.3

Ако се сва претходно наведена разматрања примене на наш проучавани систем О-П-РП, може се константовати следеће:

- На основу једначина (4.3.2.3) и (4.3.2.5) и имајући на уму чињеницу да је увек $K_\tau < 1$ (јер је случај $K_\tau = 1$ могућ математички али не и физички), може се закључити да је реални део пола "p" преносне функције $G(p)$ увек мањи од нуле (увек је негативан), па стога систем О-П-РП представља стабилан механички систем.
- На основу слике 19 и слике 22, пол преносне функције $G(p)$ може се уопштено написати у облику:

$$p = \frac{K_\tau - 1}{T_V} = -c \quad (4.4.1.3)$$

- На основу табеле Т.4.3 и слике 23 очигледно је да је у питању случај наведен под редним бројем 1, за који је имагинарна вредност пола преносне функције $G(p)$ једнака нули ($j\omega=0$) и за који је проучавани систем О-П-РП стабилан.

Међутим, без обзира на то што је на основу опште теореме о стабилности механичких система константовано да је проучавани систем стабилан, у наставку ће бити проверена стабилност система и неким од уобичајених критеријума за проверу стабилности, пре свега применом критеријума Routh-а и критеријума Hurwitz-а.

4.4.2. Стабилност система О-П-РП према критеријуму Routh-а

Routh-ов критеријум испитивања стабилности система заснива се на анализи карактеристичне једначине $N(p)$ преносне функције $G(p)$:

$$N(p) = a_n \cdot p^n + a_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + a_1 \cdot p + a_0 = 0$$

На основу карактеристичне једначине формира се Routh-ова таблица према следећој шеми:

$$\begin{array}{l} p^n \\ p^{n-1} \\ \dots \end{array} \left| \begin{array}{cccc} a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots \\ a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots \\ b_1 & b_2 & b_3 & \dots \\ c_1 & c_2 & \dots & \\ d_1 & \dots & & \\ \dots & & & \end{array} \right.$$

b_i, c_i, d_i – Routh-ови коефицијенти који се срачунавају применом Routh-ових образаца.

У случају система О-П-РП карактеристична једначина и Routh-ова таблица имају следећи облик:

$$N(p) = T_V \cdot p + 1 - K_\tau = 0$$

$$\begin{array}{l} p^1 \\ p^0 \end{array} \left| \begin{array}{cc} T_V & 0 \\ 1 - K_\tau & 0 \end{array} \right. \quad (4.4.2.1)$$

Routh-ов критеријум стабилности гласи:

”Систем је стабилан само онда када су сви елементи прве колоне Routh-ове таблице истога знака” (ово је истовремено и потребан и довољан услов стабилности).

С обзиром да је увек $T_V > 0$ и $(1 - K_T) > 0$ (оба елемента у првој колони Routh-ове таблице увек су позитивни тј. истога су знака), проучавани систем О-П-РП је према Routh-овом критеријуму стабилан систем.

4.4.3. Стабилност система О-П-РП према критеријуму Hurwitz-а

И овај критеријум такође се заснива на анализи карактеристичне једначине система $N(p)$ преносне функције $G(p)$:

$$N(p) = a_n \cdot p^n + a_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + a_1 \cdot p + a_0 = 0$$

На основу карактеристичне једначине формира се главна детерминанта система Δ_n (тзв. Hurwitz-ова детерминанта) према следећој општој шеми:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{n-2} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{n-1} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_n & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & a_0 \end{vmatrix}$$

Субдетерминанте су:

$$\Delta_1 = a_{n-1}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}$$

(на потпуно аналоган начин формирају се и све остале субдетерминанте, све до последње Δ_{n-1}).

У случају система О-П-РП карактеристична једначина и главна Hurwitz-ова детерминанта имају следећи облик (у овом случају нема субдетерминанти, јер је карактеристична једначина првога степена):

$$N(p) = T_V \cdot p + 1 - K_\tau = 0$$

$$\Delta_n = \Delta_l = |a_{n-1}| = |1 - K_\tau| > 0 \quad (4.4.3.1)$$

Hurwitz-ов критеријум стабилности гласи:

"Систем је стабилан ако су истовремено позитивни и главна (Hurwitz-ова) детерминанта система и све њене субдетерминанте, уз потребан услов да је позитиван и коефицијент у првом члану карактеристичне једначине $a_n > 0$ ".

С обзиром да је главна детерминанта $\Delta_l > 0$, да нема субдетерминанти и да је $(a_n = T_V) > 0$, проучавани систем О-П-РП је и према Hurwitz-овом критеријуму стабилан систем.

4.5. РЕЗЕРВА СТАБИЛНОСТИ ОСЦИЛАТОРНЕ ТРАНСПОРТНЕ ПЛАТФОРМЕ У ТОКУ СЕПАРАЦИЈЕ И ПРОСЕЈАВАЊА ВЛАЖНЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ

Обадва претходно изложена критеријума (Routh-ов и Hurwitz-ов) односила су се на испитивање стабилности система у смислу дефиниције стабилности изнете у оквиру тачке 4.4.1 овог поглавља, а заснивале су се на анализи преносне функције система. Међутим, у пракси је често потребно знати колика је релативна стабилност, односно како се другачије зове – резерва стабилности проучаваног система.

За одређивање резерве стабилности система О-П-РП потребно је уместо преносне функције анализирати амплитудно-фреквентну карактеристику дату једначином (4.3.3.10), што заправо представља анализу стабилности система у домену учестаности (за хармонијски улазни сигнал). Најпре треба одредити вредност максималног појачања система $M_{max}(\omega)$ и то за случај резонанције, када је спољашња побудна фреквенција једнака сопственој фреквенцији система. Ради тога, у једначини (4.3.3.10) потребно је увести смену $\omega = \omega_0$, након чега се добија:

$$|G(j\omega)|_{max} = M_{max}(\omega) = \frac{K_P \cdot e^{\left(\frac{1-K_\tau}{T_V}\right)\tau}}{\sqrt{(1-K_\tau)^2 + T_V^2 \cdot \omega_0^2}} \quad (4.5.1)$$

Према дефиницији, релативна стабилност односно *резерва стабилности* проучаваног система обрнуто је пропорционална величини $M_{max}(\omega)$ и иста износи:

$$R_S = \frac{1}{M_{max}(\omega)} = \frac{\sqrt{(1-K_\tau)^2 + T_V^2 \cdot \omega_0^2}}{K_P \cdot e^{\left(\frac{1-K_\tau}{T_V}\right)\tau}} \quad (4.5.2)$$

На основу (4.5.2) може се закључити да је резерва стабилности платформе при сепарацији влажне земљишне масе утолико већа уколико је:

- већа инертност платформе (изражена преко временске константе T_V);
- већа сопствена фреквенција осциловања платформе (ω_0);
- мањи фактор појачања платформе (K_P);
- мањи оператор кашњења платформе $e^{\left(\frac{1-K_r}{T_V}\right)\tau}$, тј. мање време кашњења τ .

Уколико је резерва стабилности платформе R_S већа, утолико постоји мања могућност да при резонанцији и при фреквенцијама блиским резонантним ($\omega \approx \omega_0$) дође до нарушавања процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе. У појединим екстремним случајевима могло би доћи до тога да производност платформе падне испод неког минимално допуштеног техно-економског критеријума, па чак и до тога да се рад платформе у потпуности заустави.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОЦЕСА СЕПАРАЦИЈЕ И ПРОСЕЈАВАЊА ВЛАЖНЕ ЗЕМЉИШНЕ МАСЕ НА ОСЦИЛАТОРНОЈ ТРАНСПОРТНОЈ ПЛАТФОРМИ

5.1. УТИЦАЈНИ ФАКТОРИ, ФАКТОРСКИ НИВОИ И ПЛАН ИЗВОЂЕЊА ЕКСПЕРИМЕНТА

Из до сада изнетих теоријских анализа рада осцилаторне платформе може се закључити да је оптимизација њених радних параметара, посматрана са аспекта сепарације и просејавања влажне земљишне масе, доста сложен и тежак задатак. Да би се извршила што прецизнија провера сепарирајућих способности платформе неопходно је вршити и практична, тј. експериментална истраживања на свакој конкретној платформи, што подразумева да за ове сврхе треба располагати са већ израђеном платформом.

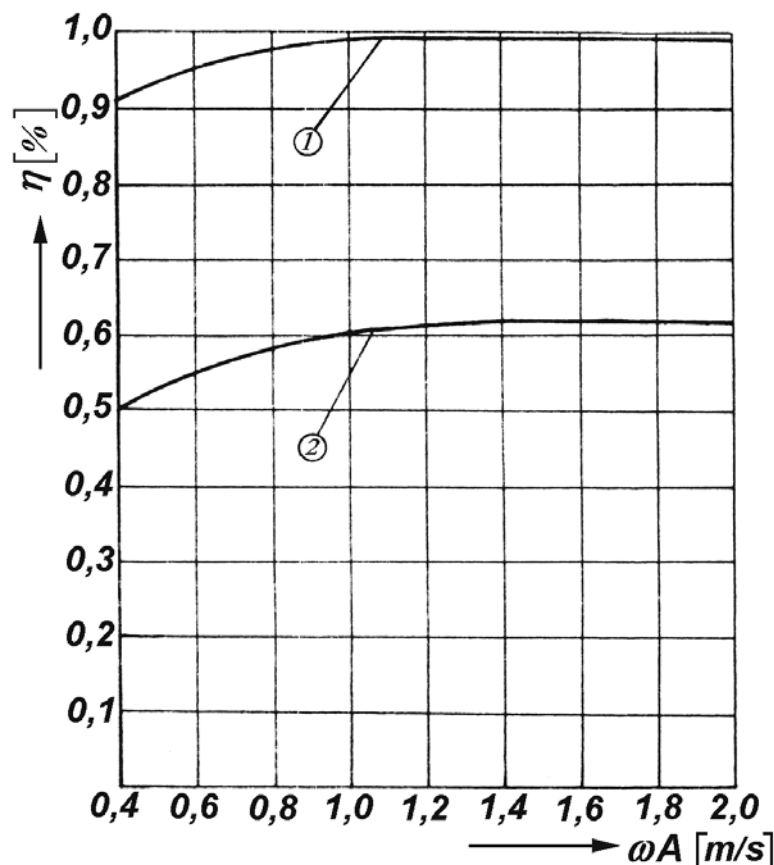
У току експерименталних истраживања биће извршено тестирање хипотезе (H_2) постављене у оквиру тачке 3.4 (стр. 30) ради њене верификације, односно прихватања или одбацивања исте.

Претпостављено је да коефицијент потпуности (финоће) сепарације η зависи од сва четири наведена фактора: брзине осциловања (ωA), влажности земље (w), величине отвора на решетки (d) и специфичног напајања платформе земљом (Q_{sp}). У даљој процедури испитиваће се да ли су све четири споменуте величине заиста сигнификантне величине, односно да ли је оправдано писати да је:

$$\eta = f(\omega A; w; d; Q_{sp}) \quad (5.1.1)$$

Међутим, у току прве фазе истраживања на Техничком факултету у Чачку на експерименталној платформи типа VWK-10 [22], константовано је да при сепарацији суве и неугрудване земље коефицијент потпуности сепарације η зависи од брзине осциловања само негде до $\omega A \approx 1 \text{ m/s}$. Изнад те брзине ($\omega A > 1 \text{ m/s}$) коефицијент потпуности сепарације има константно високу вредност ($\eta \approx 0,98$), што значи да скоро сва земља пристигла на платформу бива у потпуности просејана. Испод наведене брзине ($\omega A < 1 \text{ m/s}$) овај коефицијент је нешто мањи и износи $\eta \approx 0,92 \div 0,98$, на основу чега је изведен закључак да је рад осцилаторних платформи са брзинама осциловања мањим од 1 m/s нерационалан [1] и да га треба избегавати.

До готово идентичног закључка дошли су и истраживачи у бившем СССР-у (Бленхајм, Олевски, Џенелидзе) када се ради о сепарацији суве и неугрудване земље. Они су истовремено вршили и огледе са влажном и пластичном земљом, где су такође доказали да при брзинама осциловања $\omega A < 1 \text{ m/s}$ коефицијент финоће сепарације приближно износи $\eta \approx 0,5 \div 0,6$, док при брзинама осциловања $\omega A > 1 \text{ m/s}$ исти се устаљује на вредност од $\eta \approx 0,62$. Тиме су доказали да претходно изнети закључак важи и за сепарацију влажне и пластичне земље, где је такође нерационалан рад осцилаторних платформи са брзинама осциловања мањим од 1 m/s и да га у пракси треба избегавати. Резултате својих истраживања они су приказали преко дијаграма сепарације који је дат на сл. 24.



24. Зависност коефицијента потпуности (финоће) сепарације од брзине осциловања платформе (1-сува и неугрудвана земља; 2-влажна и пластична земља; огледни параметри: $A=20\text{mm}$; $d=25\text{mm}$; $Q_{sp}=40\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$)

Због наведене препоруке, наша експериментална платформа уграђена на вадилци кромпира VWK-10, има следеће радне параметре:

$f = 10,8 \text{ Hz}$ – фреквенција осциловања платформе (број поткопавања земље раоником у једној секунди);

$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 10,8 = 68 \text{ s}^{-1}$ – кружна фреквенција осциловања платформе;

$A = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m}$ – амплитуда осциловања платформе (полупречник ексцентра ексцентарског вратила);

$\omega A = 68 \cdot 0,02 = 1,36 \text{ m/s}$ – брзина осциловања платформе.

У питању је рад платформе у *спороходој варијанти*, за коју је у оквиру тачке 1.3 дисертације већ истакнуто да се остварује при броју обртаја од $n = 540 \text{ min}^{-1}$ на излазном вратилу трактора.

Рад платформе у брзоходој варијанти ($n=1000\text{min}^{-1}$ на излазном вратилу трактора) неће бити коришћен у току наредног експеримента из разлога континуитета истраживања, јер су сви претходни експерименти [1] обављени искључиво на спороходој варијанти осцилаторне платформе.

Имајући на уму изнету чињеницу да даљи пораст брзине осциловања изнад $1,36\text{m/s}$ не би довео до никаквог повећања коефицијента финоће сепарације (ни код суве ни код влажне земље), брзина осциловања ωA може се сасвим слободно изоставити из (5.1.1), тако да ће у нашој верзији експеримента η бити функција од три карактеристичне величине:

$$\eta = f(w; d; Q_{sp}) \quad (5.1.2)$$

Ако се поново проанализирају сл. 12 (стр. 23) и сл. 14 (стр. 31), може се закључити да сва три наведена фактора w , d , Q_{sp} имају карактер улазних величина тј. независно променљивих величина (x_1 , x_2 , x_3), док фактор η који настаје као последица дејства улазних величина представља функцију циља (функцију одзива), имајући при томе карактер зависно променљиве величине (y).

То практично значи следеће: споменути фактори w , d , Q_{sp} биће варирани у току експеримента и то у интервалу од њихових минималних до максималних прописаних вредности, односно биће варирани у интервалима: $(w_{min} \div w_{max})$, $(d_{min} \div d_{max})$, $(Q_{spmin} \div Q_{spmax})$, како би се установио утицај истих на величину η .

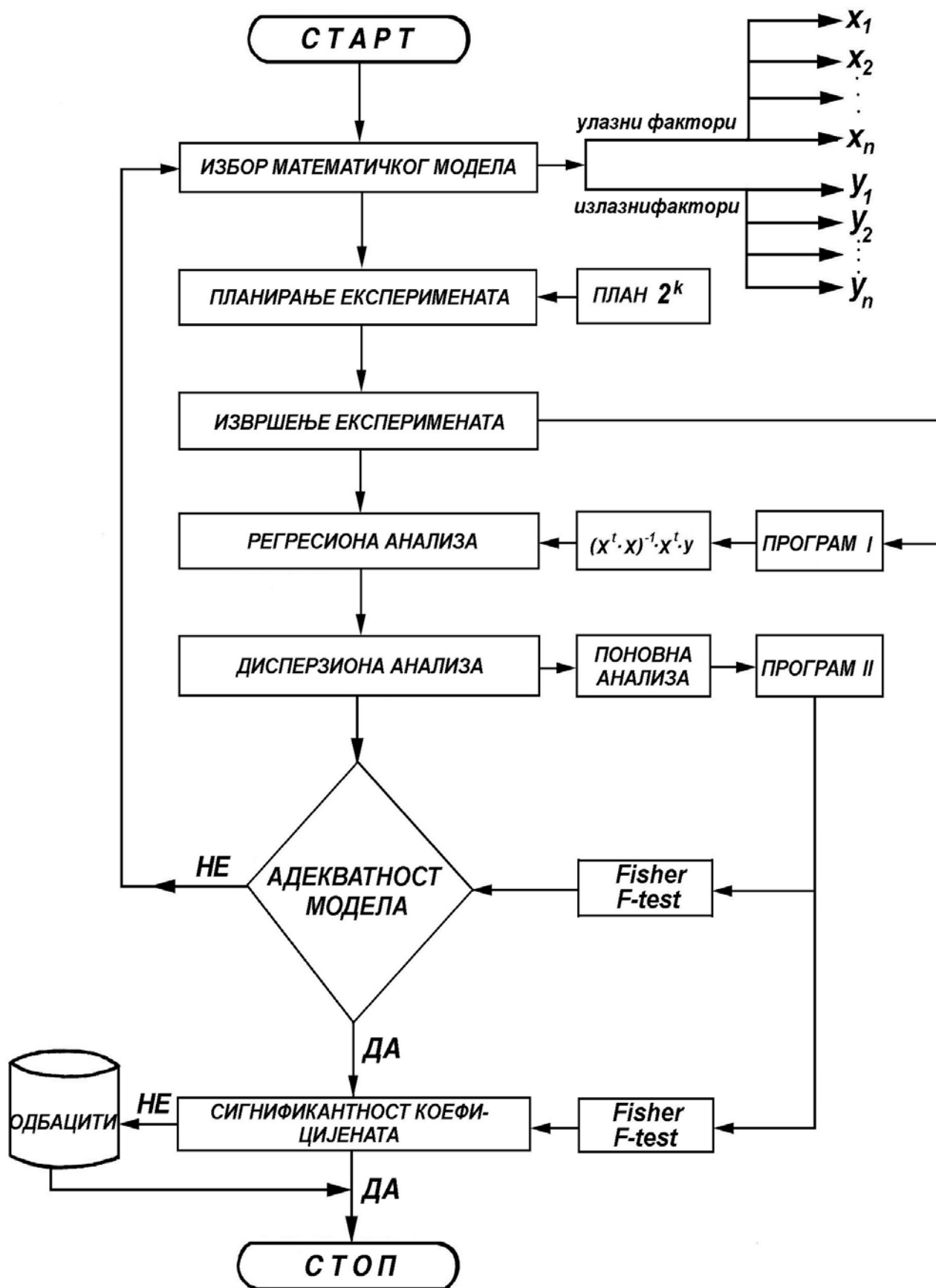
Остали фактори који су наведени на сл. 14 (стр. 31), а од којих такође зависи производност платформе, одржаваће се на константном нивоу тј. неће се нимало варирати у току експеримента, јер исти у овом случају нису предмет истраживања.

Сам експеримент биће изведен по унапред утврђеном ортогоналном плану 2^3 без узимања у обзир међусобне интеракције фактора (w , d , Q_{sp}), а анализа добијених резултата биће извршена по методологији која је у виду алгоритма дата на сл. 25. Приказана методологија заснована је на примени Responce Surface Methodology (RSM), чије се теоријске основе могу пронаћи у одговарајућој стручној литератури [29÷32]. Иста се у пракси увек аплицира у неколико карактеристичних корака:

- планирање експеримената - **Design of Experiments (DoE)**;
- регресиона анализа - **Regression Analysis (RA)**;
- анализа варијансе - **Analysis of Variance (AnoVa)**;

Примена RSM-методологије у различитим областима технике приказана је у стручним и научним радовима [33÷37], а у области агрикултуре у радовима [38÷40]. Оптимизација утицајних параметара модела у области Механизације и носећих конструкција (којој такође припада наша осцилаторна платформа) приказана је у одговарајућим SCI-радовима [41÷43].

Вишефакторни план експеримента о којем је овде реч, односно методологија приказана на сл. 25, омогућују узимање у обзир великог броја фактора о којима се нема неко веће претходно искуство, а такође и то да се после делимичних експеримената из даље анализе елиминишу они фактори који уза себе немају сигнификантне - значајне коефицијенте.



Сл. 25. Методологија реализације експеримената

Сходно расположивим информацијама, биће извршен избор факторских нивоа имајући у виду пре свега постављени циљ експеримента, а не залазећи много у неку дубљу суштину проблема који се истражује. Горњи и доњи нивои (максималне и мини-малне вредности утицајних фактора) одабирају се сходно постојећим подацима и препорукама из литературе [24], док се средњи нивои добијају прорачуном као одговарајуће средње вредности.

• ВЛАЖНОСТ ЗЕМЉЕ •

Пошто се испитује рад платформе у екстремно тешким радним условима, у оквиру тачке 2.4 (стр. 23) истакнуто је да се као зона лоше сепарације третира подручје рада платформе са дотуреном земљом чија се влажност налази у опсегу $w=(23\div 27)\%$. Из тог разлога усвајају се следеће карактеристичне вредности:

$$w_{max} = 27\%;$$

$$w_{min} = 23\%;$$

$$w_{sr} = \sqrt{w_{max} \cdot w_{min}} = \sqrt{27 \cdot 23} = 24,92\% \Rightarrow \text{Усваја се: } w_{sr} = 25\%.$$

• ВЕЛИЧИНА ОТВОРА НА РЕШЕТКИ •

Као оптимална вредност величине отвора (перфорација на решетки) платформе при раду са сувом и неугрудваном земљом [1] усвојено је $d=25mm$, што се уједно узима и као најмања дозвољена вредност при раду са влажном земљом. Као највећа препоручена вредност (имајући на уму намену платформе-у овом случају машина за вађење кромпира) усваја се $d=45mm$.

$$d_{max} = 45mm;$$

$$d_{min} = 25mm;$$

$$d_{sr} = \sqrt{d_{max} \cdot d_{min}} = \sqrt{45 \cdot 25} = 33,54mm \Rightarrow \text{Усваја се: } d_{sr} = 35mm.$$

• СПЕЦИФИЧНО НАПАЈАЊЕ ПЛАТФОРМЕ ЗЕМЉОМ •

Препоручене вредности овог фактора дате у тачки 2.4 (стр. 23) износе:

$$Q_{spmax} = 70kg/(s \cdot m);$$

$$Q_{spmin} = 20kg/(s \cdot m);$$

$$Q_{spsr} = \sqrt{Q_{spmax} \cdot Q_{spmin}} = \sqrt{70 \cdot 20} = 37,42kg/(s \cdot m) \Rightarrow \text{Усваја се: } Q_{spsr} = 40kg/(s \cdot m).$$

Одабрани факторски нивои могу се скупа приказати помоћу табеле Т.5.1.

Табела Т.5.1. Факторски нивои утицајних фактора у експерименту

ФАКТОРИ НИВОИ	ВЛАЖНОСТ ЗЕМЉЕ w [%]	ВЕЛИЧИНА ОТВОРА НА РЕШЕТКИ d [mm]	СПЕЦИФИЧНО НАПА- ЈАЊЕ ПЛАТФОРМЕ ЗЕМЉОМ Q_{SP} [kg/(s·m)]
МАКСИМАЛНИ	27	45	70
СРЕДЊИ	25	35	40
МИНИМАЛНИ	23	25	20

Као план експеримента усваја се трофакторни ортогонални план 2^3 са по једним мерењем у свакој тачки плана и са понављањем мерења у нултој тачки плана четири пута (ради веће тачности измерених резултата), при чему се неће узимати у обзир међусобна интеракција фактора: w , d , Q_{sp} .

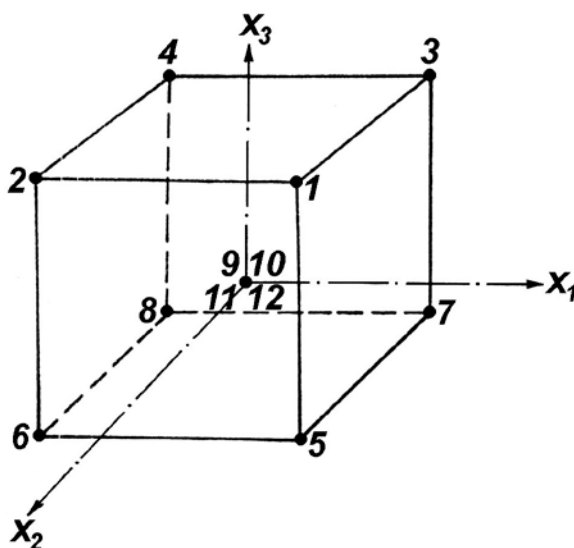
Споменути план без узимања у обзир међусобних утицаја фактора и са редоследом извођења експеримената приказан је у табели Т.5.2.

Табела Т.5.2. План-матрица за извођење експеримената*

ЕКСП. ТАЧКА	ВЛАЖНОСТ ЗЕМЉЕ w [%]	ВЕЛИЧИНА ОТВОРА НА РЕШЕТКИ d [mm]	СПЕЦ. НАПАЈАЊЕ ПЛАТФ. ЗЕМЉОМ Q_{SP} [kg/(s·m)]	ПЛАН-МАТРИЦА			
				X_0	X_1	X_2	X_3
1	27	45	70	1	1	1	1
2	23	45	70	1	-1	1	1
3	27	25	70	1	1	-1	1
4	23	25	70	1	-1	-1	1
5	27	45	20	1	1	1	-1
6	23	45	20	1	-1	1	-1
7	27	25	20	1	1	-1	-1
8	23	25	20	1	-1	-1	-1
9	25	35	40	1	0	0	0
10	25	35	40	1	0	0	0
11	25	35	40	1	0	0	0
12	25	35	40	1	0	0	0

*Напомена: Ради упрошћења при уписивању и обради експерименталних података у план-матрици, размере за координатне осе бирају се тако да максимални (горњи ниво) буде једнак +1, минимални (доњи ниво) буде једнак -1, а средњи (нулти) ниво буде раван нули (0).

На слици 35 шематски је приказан трофакторни ортогонални план извођења експеримената са четири понављања мерења у нултој тачки плана.



Сл. 26. Трофакторни ортогонални план извођења експеримената

Основни подаци о експерименту:

$k=3$ – број утицајних фактора у експерименту ($x_1 \equiv w$; $x_2 \equiv d$; $x_3 \equiv Q_{sp}$);

$n_o=4$ – број понављања мерења у нултој тачки плана;

$N_e=2^k+n_o=2^3+4=12$ – укупан број мерења (експеримената). (5.1.3)

На овај начин дефинисани су сви потребни услови за извођење експеримената.

5.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ОСЦИЛАТОРНА ТРАНСПОРТНА ПЛАТФОРМА, УСЛОВИ И РЕЖИМИ ИСПИТИВАЊА И РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА

Као што је претходно већ истакнуто, комплетна експериментална фаза истраживања изведена је у лабораторијским условима на Техничком факултету у Чачку, односно на засадима Института за кромпир у Гучи, уз примену стандардне мерно-регулационе опреме којом располажу ове установе.

Целокупно мерење обављено је на једноситој експерименталној платформи уграђеној на вибрационој вадилници кромпира типа VWK-10 приказаној на сл. 4 (стр. 5).

Циљ планираног експеримента није испитивање способности платформе у погледу транспорта влажне земљишне масе (то је учињено у првој фази истраживања и резултати су презентирани у [1]), него испитивање способности у погледу њене сепарације и просејавања. Из тог разлога, ради лакшег мерења утицајних параметара земља није поткопавана уз помоћ раоника, већ је на платформу стоварана директно са тракторске приколице помоћу корита (левка) сличног ономе које је приказано на сл. 2 (стр. 2).

На приколици је земља помоћу црева поливана водом у циљу постизања потребне влажности w , која је мерена на лицу места уз помоћ апаратуре којом располаже Агрономски факултет у Чачку. Пре тога, земља је истоварана на приколицу из пластичних буради, чија је маса претходно измерена на ваги. Брзина истовара земље из приколице, тј. брзина напајања платформе земљом контролисана је уз помоћ штопернице, настојећи при томе да се иста изручује што равномерније по целој површини решетке и тиме што прецизније обезбеди потребно специфично напајање Q_{sp} [$kg/(s \cdot m)$].

Трећи утицајни параметар-величина отвора на решетки (d) вариран је тако што су челичне траке од којих се састоји решетка међусобно удаљаване једна од друге на потребно растојање и потом фиксиране у том новом положају помоћу навојних осовиница. Ово је могуће захваљујући томе што у носећем раму-скелету платформе (позиција 6 на сл. 4, стр. 5) постоје унапред избушени отвори у које се постављају навојне осовинице.

Да би се тачно установила маса просејане земље у току експеримента, испод решетке платформе (која стоји у месту) пре почетка мерења поставља се табла лима на коју пада просејана земља у току рада платформе. Након заустављања платформе просејана земља лопатама се скида са лимене табле и товари у пластичну бурад чија се маса поново мери помоћу ваге. Дељењем измерене масе просејане земље (на крају експеримента) са измереном масом дотурене земље (на почетку експеримента) добија се вредност коефицијента потпуности сепарације η за одређену експерименталну тачку. Поступак је потребно поновити укупно дванаест пута, за сваку експерименталну тачку понаособ.

Сходно усвојеном плану експеримента (табела Т.5.2) сви релевантни фактори: w , d , Q_{sp} контролисани су и варирани у границама од +1 до -1, а добијене (измерене) вредности коефицијента потпуности сепарације η за свих дванаест извршених мерења унете су у табелу Т.5.3.

Табела Т.5.3. Измерене вредности коефицијента η у току експеримената

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ТАЧКЕ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
КОЕФ. ПОТПУНОСТИ СЕПАРАЦИЈЕ η [%]	14	58	6	48	16	60	10	50	25	24	26	22
$y_i = \ln(\eta)$	2,64	4,06	1,79	3,87	2,77	4,09	2,30	3,91	3,22	3,18	3,26	3,09

5.3. РЕГРЕСИОНА АНАЛИЗА

Ова анализа обухвата одређивање регресионих коефицијената b_i , чиме се добија представа о утицају појединих фактора на излазну функцију. Уколико се овом анализом добију фактори уз које стоје незначајни-несигнификантни коефицијенти, исти се неће узимати у обзир при даљим разматрањима. Знак регресионог коефицијента b_i пружа увид о типу утицаја датог фактора на изучавани процес, при чему знак плус (+) означава директно пропорционалан, а знак минус (-) означава обрнуто пропорционалан утицај на мерену величину η .

Општи математички модел без међусобног утицаја фактора x_1 , x_2 , x_3 има следећи облик:

$$y = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 \quad (5.3.1)$$

У једначини (5.3.1) поједине ознаке имају следеће значење:

y – логаритамска вредност мерене величине;

b_0 , b_1 , b_2 , b_3 – коефицијенти регресије који се срачунавају регресионом анализом.

Ради веће поузданости прорачуна, укупан број мерења трофакторног ($k=3$) ортогоналног плана увећава се за $n_0=4$ понављања мерења у нултој тачки плана:

$$N_e = 2^k + n_0 = 2^3 + 4 = 12$$

Даља анализа тече помоћу матричног рачуна [44].

Матрица улазних информација је:

$$x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Њена транспонована матрица је:

$$x^t = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Производ матрица ($x^t \cdot x$) у овом случају може се рачунати јер су дате матрице x^t и x сагласне, пошто је број колона матрице x^t једнак броју врста матрице x :

$$(x^t \cdot x) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Дати производ могуће је написати и у погоднијем облику и израчунати га помоћу тзв. "Фалкове методе":

$$x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x^t = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 12 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}$$

$$x^t \cdot x = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}$$

Одговарајућа инверзна матрица матрице $(x^t \cdot x)$ гласи:

$$(x^t \cdot x)^{-1} = \frac{I}{\det(x^t \cdot x)} \cdot (x^t \cdot x)^{adj}$$

где су: $\det(x^t \cdot x)$ – детерминанта матрице $(x^t \cdot x)$;

$(x^t \cdot x)^{adj}$ – адјунгована матрица матрице $(x^t \cdot x)$.

Да би се израчунала адјунгована матрица $(x^t \cdot x)^{adj}$, потребно је најпре означити матрицу $(x^t \cdot x)$ великим словом A :

$$A = x^t \cdot x = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

Развијањем детерминанте $|A|$ по одговарајућој врсти биће:

$$\det |A| = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + a_{13}A_{13} + a_{14}A_{14} \text{ (по I врсти)}$$

$$\det |A| = a_{21}A_{21} + a_{22}A_{22} + a_{23}A_{23} + a_{24}A_{24} \text{ (по II врсти)}$$

$$\det |A| = a_{31}A_{31} + a_{32}A_{32} + a_{33}A_{33} + a_{34}A_{34} \text{ (по III врсти)}$$

$$\det |A| = a_{41}A_{41} + a_{42}A_{42} + a_{43}A_{43} + a_{44}A_{44} \text{ (по IV врсти)}$$

$[A_{i,j}$ – одговарајући минори матрице A ($i, j=1, 2, 3, 4$).

Реципрочна матрица матрице A има следећи облик:

$$A^* = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix}$$

Транспонована матрица матрице A^* јесте адјунгована матрица матрице A :

$$A^{adj} = (x^t \cdot x)^{adj} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} & A_{41} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} & A_{42} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & A_{43} \\ A_{14} & A_{24} & A_{34} & A_{44} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \begin{vmatrix} 8 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{vmatrix} = 8 \begin{vmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 8 \end{vmatrix} = 8 \cdot (64 - 0) = 512$$

$$A_{22} = \begin{vmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{vmatrix} = 12 \begin{vmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 8 \end{vmatrix} = 12 \cdot (64 - 0) = 768$$

$$A_{33} = \begin{vmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{vmatrix} = 12 \begin{vmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 8 \end{vmatrix} = 12 \cdot (64 - 0) = 768$$

$$A_{44} = \begin{vmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{vmatrix} = 12 \begin{vmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 8 \end{vmatrix} = 12 \cdot (64 - 0) = 768$$

(сви остали минори у матрици $A^{adj} = (x^t \cdot x)^{adj}$ једнаки су нули).

$$A^{adj} = (x^t \cdot x)^{adj} = \begin{bmatrix} 512 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 768 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 768 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 768 \end{bmatrix}$$

$$\det(x^t \cdot x) = \begin{vmatrix} 12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 \end{vmatrix} = 12 \begin{vmatrix} 8 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{vmatrix} = 12 \cdot 8 \begin{vmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 8 \end{vmatrix} = 6144$$

Тада ће тражена инверзна матрица гласити:

$$(x^t \cdot x)^{-1} = \frac{1}{6144} \begin{bmatrix} 512 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 768 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 768 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 768 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/8 \end{bmatrix}$$

Матрица излазних информација је:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \end{bmatrix}$$

Матрица коефицијената регресије добија се на следећи начин:

$$B = (x^t \cdot x)^{-1} \cdot x^t \cdot y$$

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2,64 \\ 4,06 \\ 1,79 \\ 3,87 \\ 2,77 \\ 4,09 \\ 2,30 \\ 3,91 \\ 3,22 \\ 3,18 \\ 3,26 \\ 3,09 \end{bmatrix}$$

$(x^t \cdot x)^{-1} \cdot x^t = W$

Применом Фалкове методе добија се:

$$(x^t \cdot x)^{-1} = \begin{bmatrix} 1/12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = W$$

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/12 & 1/12 & 1/12 & 1/12 & 1/12 & 1/12 & 1/12 & 1/12 & 1/12 & 1/12 & 1/12 & 1/12 \\ 1/8 & -1/8 & 1/8 & -1/8 & 1/8 & -1/8 & 1/8 & -1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/8 & 1/8 & -1/8 & -1/8 & 1/8 & 1/8 & -1/8 & -1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/8 & 1/8 & 1/8 & 1/8 & -1/8 & -1/8 & -1/8 & -1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2,64 \\ 4,06 \\ 1,79 \\ 3,87 \\ 2,77 \\ 4,09 \\ 2,30 \\ 3,91 \\ 3,22 \\ 3,18 \\ 3,26 \\ 3,09 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{12}(2,64 + 4,06 + 1,79 + 3,87 + 2,77 + 4,09 + 2,30 + 3,91 + 3,22 + 3,18 + 3,26 + 3,09) \\ \frac{1}{8}(2,64 - 4,06 + 1,79 - 3,87 + 2,77 - 4,09 + 2,30 - 3,91) \\ \frac{1}{8}(2,64 + 4,06 - 1,79 - 3,87 + 2,77 + 4,09 - 2,30 - 3,91) \\ \frac{1}{8}(2,64 + 4,06 + 1,79 + 3,87 - 2,77 - 4,09 - 2,30 - 3,91) \end{bmatrix}$$

Из матрице B непосредно следе регресиони коефицијенти (b_i):

$$b_0 = (1/12) \cdot (38,18) = 3,182$$

$$b_1 = (1/8) \cdot (-6,43) = -0,804$$

$$b_2 = (1/8) \cdot (1,69) = 0,211$$

$$b_3 = (1/8) \cdot (-0,71) = -0,089$$

Пошто су сада коефицијенти регресије b_i познати, може се коначно написати математички модел у кодираном облику:

$$y = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 \quad (x_0=1)$$

$$y = 3,182 - 0,804 \cdot x_1 + 0,211 \cdot x_2 - 0,089 \cdot x_3 \quad (5.3.2)$$

5.4. ДИСПЕРЗИОНА АНАЛИЗА

Помоћу дисперзионе анализе одређује се значајност-сигнификантност регресионих коефицијената b_i , а такође и адекватност математичког модела. Комплетна дисперзиона анализа изводи се поступно према методологији наведеној у [44].

l) Број степени слободе:

$$f_r = N_e - k - 1 = 12 - 3 - 1 = 8$$

$$f_e = n_o - 1 = 4 - 1 = 3$$

$$f_a = f_r - f_e = 8 - 3 = 5$$

$$(f_0 = 1; f_1 = 1; f_2 = 1; f_3 = 1)$$

II) Суме квадрата:

$$s_{bo} = N_e \cdot b_o^2 = 12 \cdot 3,182^2 = 121,5015$$

$$s_{b1} = N \cdot b_1^2 = 8 \cdot (-0,804)^2 = 5,1713$$

$$s_{b2} = N \cdot b_2^2 = 8 \cdot 0,211^2 = 0,3562$$

$$s_{b3} = N \cdot b_3^2 = 8 \cdot (-0,089)^2 = 0,0634$$

III) Резидуална сума:

$$s_r = \sum_I^{12} y_i^2 - \left(N_e \cdot b_o^2 + \sum_I^3 N \cdot b_i^2 \right)$$

$$s_r = (2,64^2 + 4,06^2 + 1,79^2 + 3,87^2 + 2,77^2 + 4,09^2 + 2,30^2 + 3,91^2 + 3,22^2 + 3,18^2 + 3,26^2 + 3,09^2) - (121,5015 + 5,1713 + 0,3562 + 0,0634) = 0,1774$$

IV) Грешка експеримента у нултој тачки плана:

$$\left[\bar{y}_o = \frac{3,22 + 3,18 + 3,26 + 3,09}{4} = 3,1875 \right]$$

$$s_e = \sum_9^{12} (y_{oi} - \bar{y}_o)^2 = (3,22 - 3,1875)^2 + (3,18 - 3,1875)^2 + (3,26 - 3,1875)^2 + (3,09 - 3,1875)^2 = 0,0159$$

V) Адекватна сума:

$$s_a = s_r - s_e = 0,1774 - 0,0159 = 0,1615$$

VI) Дисперзије:

$$s_{bo}^2 = \frac{s_{bo}}{f_o} = \frac{121,5015}{1} = 121,5015$$

$$s_{b1}^2 = \frac{s_{b1}}{f_1} = \frac{5,1713}{1} = 5,1713$$

$$s_{b2}^2 = \frac{s_{b2}}{f_2} = \frac{0,3562}{1} = 0,3562$$

$$s_{b3}^2 = \frac{s_{b3}}{f_3} = \frac{0,0634}{1} = 0,0634$$

$$s_r^2 = \frac{s_r}{f_r} = \frac{0,1774}{8} = 0,0222$$

$$s_e^2 = \frac{s_e}{f_e} = \frac{0,0159}{3} = 0,0053$$

$$s_a^2 = \frac{s_a}{f_a} = \frac{0,1615}{5} = 0,0323$$

VII) Рачунско одређивање Фишерових "F-вредности":

$$F_{r0} = \frac{s_{b0}^2}{s_e^2} = \frac{121,5015}{0,0053} = 22924,8; \quad F_{r1} = \frac{s_{b1}^2}{s_e^2} = \frac{5,1713}{0,0053} = 975,7;$$

$$F_{r2} = \frac{s_{b2}^2}{s_e^2} = \frac{0,3562}{0,0053} = 67,2; \quad F_{r3} = \frac{s_{b3}^2}{s_e^2} = \frac{0,0634}{0,0053} = 11,96;$$

$$F_{ra} = \frac{s_a^2}{s_e^2} = \frac{0,0323}{0,0053} = 6,1;$$

VIII) Сигнификантност регресионих коефицијената:

За одређивање значајности регресионих коефицијената биће примењен Фишеров "F-тест", при чему се усваја да коефицијент ризика износи 5% ($\alpha=0,05$).

$$F_t(\alpha; f_i; f_e) = F_t(0,05; 1; 3) = 10,13 \text{ (према [44])}.$$

Даље се испитује да ли је свака (претходно срачуната) рачунска вредност Фишерове "F-карактеристике" већа од табличне вредности, односно проверава се да ли је у сваком конкретном случају испуњен потребан услов:

$$F_{ri} > F_t \quad (5.4.1)$$

$$F_{r0} > F_t; \quad F_{r1} > F_t; \quad F_{r2} > F_t; \quad F_{r3} > F_t \quad (5.4.2)$$

Из (5.4.2) може се уочити да је потребан услов (5.4.1) задовољен у случају свих коефицијената, што значи да се са ризиком од 5% сме тврдити да су регресиони коефицијенти: b_0, b_1, b_2, b_3 сигнификантни-значајни, тј. да су сасвим оправдано увршћени у регресиону једначину (5.3.2) која представља кодирани облик математичког модела.

IX) Адекватност математичког модела:

Овде се такође може применити Фишеров "F-тест", усвајајући и у овом случају да коефицијент ризика износи 5% ($\alpha=0,05$).

$$F_t(\alpha; f_a; f_e) = F_t(0,05; 5; 3) = 9,01 \text{ (према [44])}.$$

У овом случају потребно је да буде испуњен следећи услов:

$$F_{ra} < F_t \quad (5.4.3)$$

$$(F_{ra}=6,1) < (F_t=9,01) \quad (5.4.4)$$

Из (5.4.4) може се уочити да је потребан услов (5.4.3) испуњен, што значи да добијени математички модел у потпуности описује проучавану проблематику у вези сепарације и просејавања влажне земљишне масе на осцилаторној платформи. Исти је према томе адекватан, уз напомену да коефицијент ризика за овакву тврдњу износи претходно усвојених 5% ($\alpha=0,05$).

5.5. ДЕКОДИРАЊЕ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА

Математички модел у декодираном облику гласи [44]:

$$y = B_o \cdot x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \cdot x_3^{\beta_3} \quad (5.5.1)$$

Нивои улазних величина:

$$x_{1max}=27; \quad x_{2max}=45; \quad x_{3max}=70;$$

$$x_{1min}=23; \quad x_{2min}=25; \quad x_{3min}=20;$$

Коефицијент B_o рачуна се по обрасцу:

$$B_o = e^{\beta_o} \quad (5.5.2)$$

Експонент у једначини (5.5.2) рачуна се по обрасцу:

$$\beta_o = b_o + b_1 \cdot a_1 + b_2 \cdot a_2 + b_3 \cdot a_3 \quad (5.5.3)$$

У једначини (5.5.3) коефицијенти a_i ($i=1, 2, 3$) рачунају се на следећи начин:

$$a_1 = 1 - A_1 \cdot \ln\left(\frac{x_{1max}}{x_{1min}}\right) = 1 - 12,47 \cdot \ln 27 = -40,099$$

$$a_2 = 1 - A_2 \cdot \ln\left(\frac{x_{2max}}{x_{2min}}\right) = 1 - 3,40 \cdot \ln 45 = -11,943$$

$$a_3 = 1 - A_3 \cdot \ln\left(\frac{x_{3max}}{x_{3min}}\right) = 1 - 1,60 \cdot \ln 70 = -5,798$$

Коефицијенти A_i ($i=1, 2, 3$) имају следеће вредности:

$$A_1 = \frac{2}{\ln \frac{x_{1max}}{x_{1min}}} = \frac{2}{\ln \frac{27}{23}} = 12,47$$

$$A_2 = \frac{2}{\ln \frac{x_{2max}}{x_{2min}}} = \frac{2}{\ln \frac{45}{25}} = 3,40$$

$$A_3 = \frac{2}{\ln \frac{x_{3max}}{x_{3min}}} = \frac{2}{\ln \frac{70}{20}} = 1,60$$

Сменом нађених коефицијената a_1, a_2, a_3 и претходно срачунатих регресионих коефицијената $b_o, b_1, b_2,$ и b_3 у једначину (5.5.3), добија се:

$$\beta_o = 3,182 + (-0,804) \cdot (-40,099) + 0,211 \cdot (-11,943) + (-0,089) \cdot (-5,798) = 33,418$$

Сменом срачунатог експонента β_o у (5.5.2) добија се:

$$B_o = e^{33,418} = 3,26 \cdot 10^{14}$$

Сада је могуће срачунати вредности и свих осталих експонената:

$$\beta_1 = A_1 \cdot b_1 = 12,47 \cdot (-0,804) = -10,03$$

$$\beta_2 = A_2 \cdot b_2 = 3,40 \cdot 0,211 = 0,72$$

$$\beta_3 = A_3 \cdot b_3 = 1,60 \cdot (-0,089) = -0,14$$

Сменом свих нађених вредности у једначину (5.5.1) добија се коначна вредност математичког модела у декодираном облику:

$$y = 3,26 \cdot 10^{14} \cdot x_1^{-10,03} \cdot x_2^{0,72} \cdot x_3^{-0,14}$$

$$y = 3,26 \cdot 10^{14} \frac{x_2^{0,72}}{x_1^{10,03} \cdot x_3^{0,14}} \quad (5.5.4)$$

Имајући у виду идентичке једнакости: $y \equiv \eta$, $x_1 \equiv w$, $x_2 \equiv d$, $x_3 \equiv Q_{sp}$, једначина (5.5.4) може се написати у коначном облику који представља експериментално добијен математички модел процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе на осцилаторној платформи:

$$\eta = 3,26 \cdot 10^{14} \frac{d^{0,72}}{w^{10,03} \cdot Q_{sp}^{0,14}} \quad (5.5.5)$$

6. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

6.1. РЕЗУЛТАТИ ТЕОРИЈСКИХ ИСТРАЖИВАЊА

Теоријско истраживање проблематике сепарације и просејавања влажне земљишне масе помоћу машина са уграђеним осцилаторним платформама базира се на основним претпоставкама и начелима изнетим у оквиру главе 2 ове дисертације. У овој глави објашњен је радни учинак (производност) осцилаторних транспортних платформи, у оквиру чега су детаљно образложени:

- *Кинематски и динамички параметри утицајни на рад платформе* – најпре је изречена констатација да радни орган платформе изводи типично осцилаторно кретање, при коме су брзина и убрзање решетке дефинисани једначинама (2.1.2) и (2.1.3). Овакво кретање проузрокује снажну инерциону силу F^n која је увек усмерена супротно од убрзања решетке. Ова сила истовремено омогућује како транспорт честица чврсте масе дуж решетке платформе, тако и разбијање чврсте масе услед сударања одбачених честица [45]. Извршена је кинематска анализа кретања платформе за свих пет могућих режима рада исте (дијаграми Олевског, сл. 8 /стр.11), где је установљено да је најоптималнији режим рада онај при коме наступа *одбацивање материјала од платформе по принципу косог хица* (случај "д" на споменутом дијаграму). За овај режим рада неопходно је да убрзање платформе испуњава услов дат једначином (2.1.5).

- *Оптимални број обртаја платформе (n_{opt})* који је исказан једначином (2.2.14'), а који је према (2.2.14'') функција од три утицајне величине:

- амплитуде осциловања (A);
- угла нагиба решетке према хоризонтали (α);
- угла транспорта платформе (β).

Зависност оптималног броја обртаја платформе од наведених трију величина детаљно је испитана у току експерименталне фазе истраживања на Техничком факултету у Чачку (1995. год.). Тада су и конструисани дијаграми за избор оптималних режима рада осцилаторних транспортних платформи, а који су наведени у ПРИЛОГУ П4 /глава 9 ове дисертације, у раду [46], као и у SCI-раду [47].

- Утицајни фактори на транспортовање земљишних наслага (слојева), а који утичу на средњу брзину померања слојева по платформи v_{sr} (сл. 10 /стр. 21), као и утицајни фактори на транспортовање изолованих тела (грумења земље) који утичу на брзину померања грумења земље по платформи v_g (сл. 11 /стр. 22).

- Утицајни фактори на коефицијент потпуности сепарације и просејавања земљишне масе (η), који је функција од четири величине (сл. 12 /стр. 23):

- брзине осциловања (ωA);
- влажности земље (w);
- величине отвора на решетки (d);
- напајања-дотура земље на платформу (Q_{sp}).

У глави 3 извршено је планирање истраживања које је подељено у две карактеристичне фазе:

- фазу теоријског истраживања, у оквиру које је извршена верификација постављене хипотезе (H_1) ;

- фазу експерименталног истраживања, у оквиру које је извршена верификација постављене хипотезе (H_2) ;

Хипотеза (H_1) претпостављала је да се процес сепарације (просејавања) влажне земљишне масе може приказати засебним теоријским математичким моделом. Такође је претпостављено да је при било којим радним режимима рад платформе увек стабилан, што подразумева да се њена производност битно не нарушава услед дејства било каквих спољашњих или унутрашњих поремећаја.

Да би се извршила верификација хипотезе (H_1) , било је неопходно да се најпре оформи математички модел који у функцији времена описује процес сепарације и просејавања влажне земљишне масе на осцилаторној транспортној платформи, што је и учињено у оквиру главе 4, тачка 4.1. Модел је дат диференцијалном једначином првога реда (4.1.11), у којој поред независно променљиве x и зависно променљиве u фигуришу и три константе: временска-инерцијална константа T_V , фактор појачања система K_p и коефицијент кашњења просејане земље у односу на дотурену земљу K_τ .

У циљу даље анализе, односно испитивања динамичког понашања платформе у току њеног рада, оформљен је систем О-П-РП (окружење-платформа-радни параметри) који је приказан на сл. 16 /стр. 42, односно на сл. 17 /стр. 42. Примењен је концепт црне кутије, по коме се закључци о понашању читавог система доносе само на основу улазне (побудне) величине и на основу излазне (одзивне) величине система.

Као улазна (побудна) величина најпре је примењена одскочна функција $x(t)=x_0(t)$, помоћу које је добијен одзив на дату побуду тј. опште решење математичког модела (4.1.11), а које је дато једначином (4.3.1.9) као збир одговарајућег хомогеног и партикуларног решења и у којој такође фигуришу све три споменуте константе (T_V , K_p , K_τ). Графички приказ одзива датог једначином (4.3.1.9) дат је на сл. 18 /стр. 47, са које се јасно уочава време кашњења τ одзива у односу на побуду, а које је утолико веће уколико је већа влажност тј. лепљивост земље (за суву и неугрудвану земљу било би $\tau \approx 0$).

Преносна функција система О-П-РП дата је једначином (4.3.2.3) /стр. 48 и у њој такође фигуришу све три карактеристичне константе (T_V , K_p , K_τ). Преносна функција $G(p)$ дата је у равни комплексне променљиве $p=c+j\omega$, у којој дата преносна функција не поседује ни једну нулу, али поседује један пол. Положај овог пола у односу на координатни почетак дефинисан је једначином (4.3.2.5) и графички је приказан на "ПН-дијаграму" система датом на сл. 19/стр. 49. Вредност оператора кашњења система $e^{-\tau p}$ дата је једначином (4.3.2.6).

Због чињенице да преносна функција $G(p)$ не поседује ни један пол нити нулу у координатном почетку комплексне "p"-равни, као и због тога што садржи време кашњења τ , проучавани систем О-П-РП представља специфичну комбинацију која је у теорији моделирања позната под именом апериодични елемент првога реда са кашњењем.

У наставку динамичке анализе проучаваног система примењена је метода фреквентног одзива, тј. тестирање система помоћу улазног хармонијског сигнала $x(t)$ датог једначином (4.3.3.1), при чему је добијен такође хармонијски излазни сигнал $y(t)$ дат једначином (4.3.3.2). На тај начин су добијени:

- карактеристика учестаности $G(j\omega)$ система О-П-РП, једначина (4.3.3.4);
- амплитудно-фреквентна карактеристика учестаности $|G(j\omega)|=M(\omega)$ система О-П-РП, једначина (4.3.3.10);
- фазно-фреквентна карактеристика $\varphi(\omega)$ система О-П-РП, једначина (4.3.3.12);
- поларни дијаграм карактеристике учестаности система О-П-РП, сл. 21/стр. 55.

Битно је напоменути да су све споменуте величине функција од побудне фреквенције система (ω), али у њима истовремено фигуришу све три карактеристичне константе система (T_V , K_p , K_τ), што само додатно указује на велики утицај ових константи на функционисање система О-П-РП.

У оквиру тачке 4.4 најпре је објашњена разлика између термина *општа стабилност платформе* и термина *управљивост платформе*. На основу опште теореме о стабилности механичких система дошло се до конкретног закључка да је проучавани систем О-П-РП стабилан систем, чији се радни ефекат (производност) битно не нарушава услед дејства било каквих спољашњих или унутрашњих поремећаја. Стабилност проучаваног система додатно је верификована и помоћу два широко примењивана критеријума за тестирање стабилности линеарних система:

- применом критеријума Routh-а, на основу Routh-ове таблице (4.4.2.1);
- применом критеријума Hurwitz-а, на основу Hurwitz-ових детерминанти и субдетерминанти датих једначином (4.4.3.1);

Релативна стабилност, односно резерва стабилности система О-П-РП размотрена је у оквиру тачке 4.5, у којој се дошло до једначине (4.5.2) из које је очигледно да резерва стабилности платформе R_S поред сопствене фреквенције осциловања система ω_0 , и у овом случају зависи од све три утицајне константе проучаваног система (T_V , K_p , K_τ).

Све изречене константације наводе на закључак да се постављена хипотеза (Н1) може у потпуности прихватити, јер постављени теоријски математички модел омогућује комплетну динамичку анализу процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе помоћу осцилаторне транспортне платформе (ово верификује прву претпоставку у оквиру хипотезе). При томе се функционисање комплетног система О-П-РП у свим ситуацијама одвија на стабилан начин (што верификује другу претпоставку у оквиру постављене хипотезе).

Комплетни резултати динамичког моделирања процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе помоћу осцилаторне транспортне платформе презентирани су у стручном раду [48] од стране наведених аутора.

6.2. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА

И поред великих могућности које истраживачима пружају различите теоријске методе математичког моделирања, или методе рачунарске симулације које су задњих година веома много усавршене, неопходно је, ради добијања што релевантнијих резултата потребних за оптимизацију радних параметара платформе, извршити и што прецизнија експериментална мерења на одређеном-конкретном типу осцилаторне транспортне платформе. Тако су у нашем случају иста обављена помоћу експерименталне осцилаторне платформе уграђене на вибрационој вадилници кромпира типа VWK-10 (сл. 4 /стр. 5), уз напомену да је рад платформског дела машине (позиција 4 на слици 4) истоветан и код свих осталих врста платформских машина. На тај начин могуће је извршити генерализацију резултата експерименталних истраживања, тј. применити их на сличне или потпуно нове машине и уређаје који у свом раду користе платформе истог типа.

Комплетна глава 5 ове дисертације односи се на експерименталну фазу истраживања која је обављена по методологији која је у виду алгорита приказана на сл. 25/стр. 67, а све у циљу верификације постављене хипотезе (H₂). Овом хипотезом претпостављено је да коефицијент финоће сепарације зависи од четири утицајна фактора:

$$\eta = f(\omega A; w; d; Q_{sp})$$

Међутим, како наша експериментална платформа ради са брзином осциловања $\omega A = 1,36 \text{ m/s}$, а брзина осциловања има утицаја само до $\omega A \leq 1 \text{ m/s}$, овај фактор је у нашем експерименту занемарен и услед тога је претпостављено да је коефицијент финоће сепарације функција од три утицајна фактора: влажности земље (w), величине отвора на решетки (d) и специфичног напајања платформе земљом (Q_{sp}):

$$\eta = f(w; d; Q_{sp})$$

Другачије речено, то подразумева да сва три утицајна фактора (w , d , Q_{sp}) морају бити сигнификантне-значајне величине, а експериментално добијени математички модел мора бити адекватан.

Након избора факторских нивоа варираних фактора [$w_{min} \div w_{max}$], [$d_{min} \div d_{max}$], [$Q_{spmin} \div Q_{spmax}$] сходно постојећим препорукама из литературе (табела Т.5.1/стр. 68) и усвајања план-матрице за извођење експеримената (табела Т.5.2/стр. 69), приступило се мерењу коефицијента η у карактеристичним експерименталним тачкама, при чему су измерени резултати приказани у табели Т.5.3/стр. 71. На основу свих претходних података извршена је статистичка обрада добијених резултата мерења и то у три карактеристичне фазе:

→ фаза *регресионе анализе* којом се дошло до регресионе једначине (5.3.2) која представља кодирани облик математичког модела и у којој су два регресиона коефицијента негативна ($b_1=-0,804$; $b_3=-0,089$), а један је позитиван ($b_2=0,211$). Пораст негативних коефицијената смањује излазну величину η , док пораст позитивног коефицијента повећава вредност излазне величине η ;

→ фаза *дисперзионе анализе* којом је утврђено да су сва три регресиона коефицијента сигнификантна-значајна, због испуњености потребног услова из неједначине (5.4.2), а што се заправо односи на утицајне факторе w , d , Q_{sp} . Истовремено је и експериментално добијени математички модел адекватан, јер је испуњен потребан услов дат неједначином (5.4.4);

→ фаза *декодирања математичког модела* којом је кодирани облик математичког модела дат једначином (5.3.2) декодиран и преведен у апликативни облик математичког модела дат једначином (5.5.5), која на тај начин представља оригинални експериментално добијен математички модел процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе на осцилаторној транспортној платформи.

Из експериментално добијеног математичког модела (5.5.5) запажа се да са порастом величине отвора на решетки ($d\uparrow$) коефицијент финоће сепарације расте ($\eta\uparrow$), што значи да се у том случају ради о директној пропорционалности. Насупрот томе, са порастом влажности земље ($w\uparrow$) и порастом вредности специфичног напајања платформе земљом ($Q_{sp}\uparrow$) коефицијент финоће сепарације опада ($\eta\downarrow$), што значи да је у питању обрнута пропорционалност између наведених фактора. Сходно табелама Т.5.2 /стр. 69 и Т.5.3 /стр. 71 максимална вредност коефицијента финоће сепарације добијена је у експерименталној тачки 6 ($\eta=60\%$, за $w_{min}=23\%$, $d_{max}=45mm$, $Q_{spmin}=20kg/(s\cdot m)$), док је минимална вредност коефицијента финоће сепарације добијена у експерименталној тачки 3 ($\eta=6\%$, за $w_{max}=27\%$, $d_{min}=25mm$, $Q_{spmax}=70kg/(s\cdot m)$).

Упоредивањем вредности експонената у (5.5.5) може се закључити да највећи утицај на коефицијент финоће сепарације η испољава влажност земље ($|\beta_1|=10,03$), знатно мањи утицај има величина отвора на решетки ($|\beta_2|=0,72$), а најмањи утицај испољава специфично напајање платформе земљом ($|\beta_3|=0,14$). Зато се споменути утицаји могу приказати следећом неједначином:

$$|\beta_1| > |\beta_2| > |\beta_3| \quad (6.3.1)$$

Због чињенице да су сва три претпостављена утицајна фактора (w , d , Q_{sp}) заиста сигнификантни-значајни фактори, као и због експериментално доказане адекватности математичког модела, постављена хипотеза (H_2) може се у потпуности прихватити, уз коефицијент ризика од 5% према Фишеровом "F"-критеријуму који је један од најприхваћенијих критеријума у математичкој статистици.

6.2.1. Табеларни приказ резултата експерименталних истраживања

Комплетна дисперзиона анализа приказана је у засебној табели Т.6.1, а сви подаци из експерименталне фазе истраживања дати у табелама Т.5.1 /стр. 68, Т.5.2 /стр. 69 и Т.5.3 /стр. 71, могу се ради прегледности објединити и дати у заједничкој табели Т.6.2 која приказује корелацију улазно-излазних информација.

Табела Т.6.1. Дисперзиона анализа – оцена сигнификантности утицајних фактора: w , d , Q_{sp} и адекватности математичког модела

КОЕФИЦИЈЕНТИ РЕГРЕСИЈЕ (b_i)	КОЕФИЦИЈЕНТИ МОДЕЛА РЕГРЕСИЈЕ ($B_0; \beta_i$)	БРОЈ СТЕПЕНИ СЛОБОДЕ (f_i)	СУМА КВАДРАТА $S_{bi} = N_i \cdot b_i^2$	ДИСПЕРЗИЈА $S_{bi}^2 = \frac{S_{bi}}{f_i}$	ДИСПЕРЗИОНИ ОДНОС $F_{ri} = \frac{S_{bi}^2}{S_e^2}$	ФИШЕРОВА ТАБЛИЧНА ВРЕДНОСТ $F_t(\alpha; f_i; f_e)$	ЗАКЉУЧАК ФИШЕРОВОГ "F"-ТЕСТА
$b_0=3,182$	$B_0=3,26 \cdot 10^{14}$	$f_0=1$	$S_{b0}=121,5015$	$S_{b0}^2 = 121,5015$	$F_{r0}=22924,8$	$F_{t0}=10,13$	$F_{r0} > F_{t0}$ b_0 сигнифик.
$b_1=-0,804$	$\beta_1=-10,03$	$f_1=1$	$S_{b1}=5,1713$	$S_{b1}^2 = 5,1713$	$F_{r1}=975,7$	$F_{t1}=10,13$	$F_{r1} > F_{t0}$ b_1 сигнифик.
$b_2=0,211$	$\beta_2=0,72$	$f_2=1$	$S_{b2}=0,3562$	$S_{b2}^2 = 0,3562$	$F_{r2}=67,2$	$F_{t2}=10,13$	$F_{r2} > F_{t0}$ b_2 сигнифик.
$b_3=-0,089$	$\beta_3=0,14$	$f_3=1$	$S_{b3}=0,0634$	$S_{b3}^2 = 0,0634$	$F_{r3}=11,96$	$F_{t3}=10,13$	$F_{r3} > F_{t0}$ b_3 сигнифик.
Резидуална сума	-----	$f_r=8$	$S_r=0,1774$	$S_r^2 = 0,0222$	-----	-----	-----
Грешка експеримента	-----	$f_e=3$	$S_e=0,0159$	$S_e^2 = 0,0053$	-----	-----	-----
Адекватност математ. модела	-----	$f_a=5$	$S_a=0,1615$	$S_a^2 = 0,0323$	$F_{ra}=6,1$	$F_t=9,01$	$F_{ra} < F_t$ модел адекват.

Табела Т.6.2. Корелација улазно-излазних информација у току експерименталне фазе истраживања

Експ. тачка	План-матрица				Независно променљиве			Зависно променљива
	x_0	x_1	x_2	x_3	Влажност земље w [%]	Величина отвора на решетки d [mm]	Спец. напајање платф. земљом Q_{sp} [kg/(s·m)]	Коефицијент потпуности сепарације η [%]
1	1	1	1	1	27	45	70	14
2	1	-1	1	1	23	45	70	58
3	1	1	-1	1	27	25	70	6
4	1	-1	-1	1	23	25	70	48
5	1	1	1	-1	27	45	20	16
6	1	-1	1	-1	23	45	20	60
7	1	1	-1	-1	27	25	20	10
8	1	-1	-1	-1	23	25	20	50
9	1	0	0	0	25	35	40	25
10	1	0	0	0	25	35	40	24
11	1	0	0	0	25	35	40	26
12	1	0	0	0	25	35	40	22

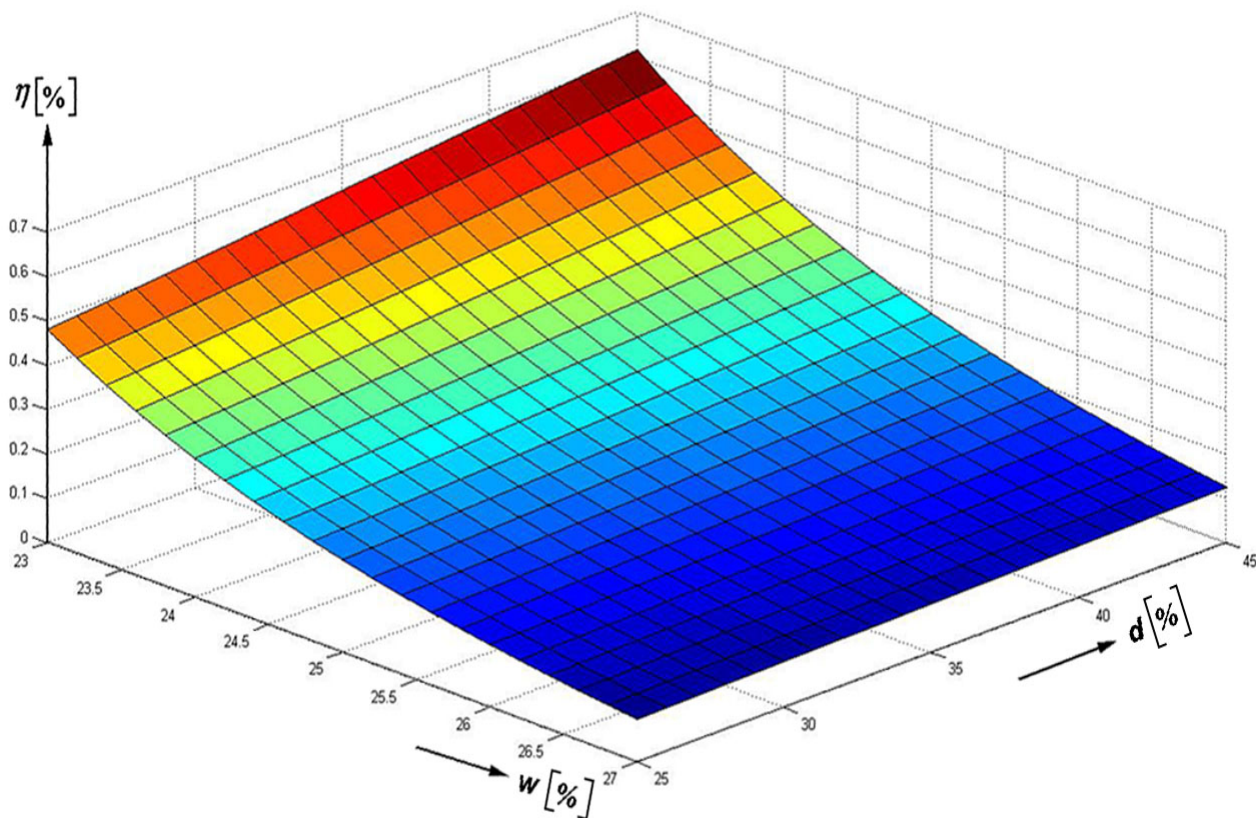
*Напомена: Ради упрошћења при уписивању и обради експерименталних података у план-матрици, размере за координатне осе бирају се тако да максимални (горњи ниво) буде једнак +1, минимални (доњи ниво) буде једнак -1, а средњи (нулти) ниво буде раван нули (0).

6.2.2. Графички приказ резултата експерименталних истраживања

Ако се поново проанализира неједначина (6.3.1), запажа се да је специфично напајање платформе земљом Q_{sp} најмање утицајан фактор на сепарацију и просејавање влажне земљишне масе (јер је експонент $|\beta_3|=0,14$). Следећи фактор по рангу значајности јесте величина отвора на решетки d (експонент $|\beta_2|=0,72$), а далеко нај-утицајнији фактор јесте влажност земље w (експонент $|\beta_1|=10,03$).

Из наведеног разлога, а у циљу лакшег и једноставнијег графичког приказивања, могуће је извршити упрошћење и сматрати да је $Q_{sp} \approx \text{const}$, док се остала два утицајна фактора-влажност земље и величина отвора на решетки третирају као варијабилне величине ($w \neq \text{const}$, $d \neq \text{const}$).

Графички приказ оптимизације утицајних параметара на сепарацију и просејавање влажне земљишне масе дат је на слици 27.



Сл. 27. Оптимизација радних параметара утицајних на сепарацију и просејавање влажне земљишне масе помоћу осцилаторне транспортне платформе

7. ЗАКЉУЧЦИ ИСТРАЖИВАЊА

На овом месту биће наведени најважнији закључци до којих је дошао аутор дисертације, како на основу сопствених истраживања и публикованих стручних радова, тако и на основу радова публикованих од стране других истраживача који се баве наведеном проблематиком.

Просејавање влажних материјала помоћу машина и уређаја са уграђеним осцилаторним платформама представља веома сложен и комплексан процес, за чију је успешну реализацију неопходан мултидисциплинарни приступ. С обзиром на бројна међусобно супростављена ограничења и на релативно велики број утицајних фактора, споменути задатак треба третирати као својеврстан оптимизациони процес. Испуњавање једног критеријума оптимизације често може довести до неиспуњавања неког другог критеријума, па коначно решење, као и увек у сличним ситуацијама, мора представљати компромис.

Основна намера аутора од самог почетка израде дисертације била је та да на једном месту изврши генерализацију теоријских и практичних резултата истраживања, јер је принцип рада платформи истоветан без обзира на подручје њихове примене. Тиме би исти попримили универзални карактер и имали би велику апликативну вредност при пројектовању сличних, или чак и нових машина и уређаја који би у свом раду користили исте такве платформе.

У уводном делу дисертације (глава 1) указано је на специфичности транспорта, разбијања и сепарације влажне земљишне масе помоћу машина са осцилаторним платформама, описан је принцип њиховог рада и функционисања и наведени су примери њихове примене у конкретним областима технике (пољопривреда, рударство, грађевинарство, ...).

Радни параметри (геометријски, кинематски, динамички) који утичу на производност платформи детаљно су образложени у оквиру главе 2 дисертације и исти су приказани на сликама 10, 11 и 12 (странице 21, 22 и 23). Константована је чињеница да је од могућих пет режима рада платформе (дијаграми на сл. 8/стр. 11) најоптималнији режим рада при коме наступа одбацивање материјала од платформе по принципу косог хица (случај "д" на споменутом дијаграму). За овакав режим рада неопходно је да убрзање платформе испуњава услов дат једначином (2.1.5).

Аутор дисертације је, истражујући режим рада платформе са одбацивањем материјала, дошао до два веома важна закључка, за које сматра да представљају конкретан допринос широј стручној и научној јавности (прилог ПЗ/ глава 9):

♦**Закљ. 1:** Са порастом амплитуда осциловања платформе у опсегу $(5\div 15)mm$ долази до "оштрог" снижавања фреквенција осциловања неопходних за наступање режима рада са одбацивањем материјала. Порастом амплитуда осциловања у опсегу $(15\div 30)mm$ захтеване фреквенције се и даље смањују, али сасвим "благо". Даљи пораст амплитуда осциловања (изнад $30mm$) практично више не доводи до никаквог позитивног ефекта, па је зато рад осцилаторних платформи са амплитудама већим од $30mm$ сасвим нерационалан и непрепоручљив.

♦**Закљ. 2:** Захтевано убрзање платформе за наступање режима рада са одбацивањем материјала много је прикладније достизати увећањем фреквенција, уместо увећањем амплитуда осциловања.

Дати закључци су универзалног карактера, за сва подручја примене платформи и важе како за транспорт суве, тако и за транспорт влажне земљишне масе, у свим гранама и областима технике.

Методолошки приступ, план и ток истраживања, изложени су у оквиру главе 3, што је подразумевало дефинисање: проблема истраживања, оправданости самог истраживања, циљева и хипотеза истраживања, експерименталних променљивих и поступака и техника за елаборацију података и измерених резултата. Комплетно истраживање реализовано је у две фазе и то: фази теоријског истраживања (глава 4) и фази експерименталног истраживања (глава 5).

Фаза теоријског истраживања обухваћена је главом 4 дисертације, у оквиру које је извршено динамичко моделирање сепарације и просејавања влажне земљишне масе помоћу осцилаторне транспортне платформе. Аутор дисертације дошао је до сопственог теоријског математичког модела датог диференцијалном једначином првог реда (4.1.11). Ова једначина јесте својеврсна генерализација модела датог у [1], а који је се односио на просејавање суве земље. Аутор такође сматра да се допринос модела (4.1.11) широј корисничкој јавности може исказати следећим конкретним закључком:

♦**Закљ. 3:** Транспорт суве земљишне масе може се третирати као специјалан случај транспорта влажне земљишне масе, јер све наведене једначине и обрасци за транспорт влажне земљишне масе: (4.1.11), (4.2.7), (4.2.8), (4.3.1.9), (4.3.2.3), (4.3.2.5), (4.3.2.6), (4.3.3.4), (4.3.3.10), (4.3.3.12) и (4.5.2) важе и при транспорту суве земљишне масе када се у њима стави да је: $K_r=0$ и $\tau=0$ (K_r - коефицијент кашњења просејане земље у односу на дотурену земљу; τ - време кашњења просејане земље у односу на дотурену земљу).

У оквиру главе 4 постављена је и потом верификована хипотеза (H_1) , што је детаљно образложено у оквиру анализе резултата теоријских истраживања (глава 6/ тачка 6.1/ стр. 81÷84).

Фаза експерименталног истраживања обухваћена је главом 5 дисертације и изведена је на експерименталној платформској машини приказаној на сл. 4/ стр. 5, а по методологији која је у виду алгоритма приказана на слици 25/ стр. 67. Аутор дисертације је и овом приликом дошао до оригиналног експерименталног модела датог једначином (5.5.5). На основу овог модела очигледно је да величина отвора на решетки платформе (d) испољава директан утицај (директну пропорционалност) на коефицијент финоће сепарације η , док влажност земље (w) и специфично напајање платформе земљом (Q_{sp}) испољавају индиректан утицај (индиректну пропорционалност) на величину η . Допринос овог модела широј корисничкој јавности огледа се у томе што су њиме верификоване литературне константације презентирани у оквиру тачке 2.4 (стр. 22÷23). Стога се могу исказати следећи конкретни закључци у вези финоће сепарације влажне земљишне масе:

◆Закљ. 4: Влажност земље w далеко је најутицајнији фактор на финоћу сепарације η ($|\beta_1|=10,03$ према (5.5.5)), па ако је $w>27\%$ рад осцилаторне платформе постаје потпуно неефикасан и не препоручљив због драстичног пада њене производности. Никакве додатне конструкционе мере не могу много допринети ефикаснијем раду платформе у овако отежаним радним условима.

◆Закљ. 5: Величина отвора на решетки d је приближно 14 пута мање утицајан фактор од влажности земље w на финоћу сепарације η ($|\beta_2|=0,72$ према (5.5.5)) и његово повећање има ефекта само до влажности $w\approx 25\%$. Изнад ове влажности η се не повећава чак ни при осетнијем повећању величине отвора на решетки.

◆Закљ. 6: Специфично напајање Q_{sp} тј. дотур земље на платформу је најмање утицајан фактор на финоћу сепарације η ($|\beta_3|=0,14$ према (5.5.5)) и његово повећање изнад горње границе може проузроковати самоистоваривање земљишне масе и знатно смањење величине η . У пракси је потребно за сваку платформску машину понаособ најпре експериментално установити, а потом прописати оптималну товарну вредност фактора Q_{sp} .

◆Закљ. 7: У свим конкретним случајевима примене осцилаторних платформи за сепарацију и просејавање влажне земљишне масе треба увек настојати да радни режими буду што ближи онима који су у нашем експерименту били заступљени у експерименталној тачки 6 ($w=23\%$, $d=45mm$, $Q_{sp}=20kg/(s\cdot m)$), јер је тада коефицијент финоће сепарације максималан и износи $\eta=60\%$ (према Т.6.2/ стр. 87). Насупрот томе, у пракси треба избегавати радне режиме сличне онима у експерименталној тачки 3 ($w=27\%$, $d=25mm$, $Q_{sp}=70kg/(s\cdot m)$), јер коефицијент финоће сепарације тада има минималну вредност од $\eta=6\%$ (такође према Т.6.2/ стр. 87).

У оквиру главе 5 постављена је и потом верификована хипотеза (H_2) , што је детаљно образложено у оквиру анализе резултата експерименталних истраживања (глава 6/ тачка 6.2/ стр. 84÷88).

Из свега изложеног може се закључити да је оптимизација утицајних параметара веома битна за постизање максималне производности осцилаторних платформи за транспорт и сепарацију влажне земљишне масе. Како се у данашње време од транспортних машина и уређаја захтевају све већа сигурност, поузданост и стабилност у раду и при најтежим радним условима, то је потребно још у фази конструисања испунити све наведене захтеве. То је једина гаранција да ће платформске машине у реалним експлоатационим условима беспрекорно функционисати, на обострано задовољство како произвођача, тако и корисника конкретних машина и уређаја.

На крају, треба напоменути да је овом дисертацијом углавном обухваћена методологија истраживања утицајних фактора на рад осцилаторне платформе, у циљу оптимизације њене производности. Даљим усавршавањем математичког модела (преласком на нелинеарне), компјутерском симулацијом рада платформе при граничним режимима, нехармонијским кретањем радних органа, другачијим вешањем, итд., могуће је доћи до нових и оригиналних закључака у вези проучаване проблематике. Стога су у оквиру главе 8 наведени конкретни предлози за даља истраживања са неким новим функцијама циља, у овој интересантној и специфичној области. Ово може бити од велике практичне користи свима који се баве конструкцијом, експлоатацијом и одржавањем платформских машина и уређаја у области транспортне логистике.

8. ПРЕДЛОЗИ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА

Оптимизација радних параметара машина и уређаја који у свом раду користе осцилаторне платформе за просејавање и сепарацију влажне земљишне масе представља веома сложен и комплексан задатак. Да би се иста обавила у потпуности, потребна су бројна теоријска и експериментална истраживања која се морају надовезати на већ обављена истраживања, као и на објављене резултате у научној и стручној јавности. Из споменутих разлога, резултати и закључци до којих се дошло у нашем истраживању могли би, исто тако, да послуже као полазна основа тј. база за нека наредна слична или нова истраживања споменуте проблеме-матике. Стога се на самом крају ове дисертације износе неки од могућих предлога, препорука и сугестија за планирање, елаборацију и конкретну реализацију будућих истраживања.

- У уводном делу дисертације истакнуто је да наша експериментална платформа уграђена на вибрационој вадилици кромпира типа VWK-10 има могућност рада у два различита режима и то:

1. спороходи радни режим ($n=540\text{min}^{-1}$ на излазном вратилу трактора, при коме кружна фреквенција осциловања платформе износи $\omega=68\text{s}^{-1}$, а фреквенција осциловања платформе тј. број поткопавања земље раоником у једној секунди износи $f=10,8\text{Hz}$);

2. брзоходи радни режим ($n=1000\text{min}^{-1}$, $\omega=127\text{s}^{-1}$, $f=20,2\text{Hz}$).

Сва наша истраживања у вези сепарације и просејавања земљишне масе изведена су са спороходим радним режимом платформе, из разлога континуитета истраживања, јер су претходно сви експерименти са сувом и неугрудваном земљом такође изведени при спороходом радном режиму. На тај начин омогућена је компарација добијених резултата, односно упоређивање радних параметара платформе при раду са сувом земљом и при раду са влажном и пластичном земљом.

Зато се предлаже једно потпуно ново теоријско и експериментално истраживање како са сувом тако и са влажном земљом по потпуно истој методологији истраживања, али при *брзоходом радном режиму* при коме су радни услови знатно "оштрији". Тада би и динамичко понашање платформе у току сепарације било сасвим различито у односу на спороходи радни режим.

• На слици 3 /стр. 3 приказане су разне варијанте осцилаторних транспортних платформи и то: једносите (случајеви: "а", "б", "в") и двосите (случајеви: "г", "д"). Једносите су једноставније конструкције, па се зато чешће сусрећу у пракси. Наша експериментална платформа поседује једно сито (сл. 4/стр. 5), док је пример реализоване платформе са два сита приказан на сл. 13/стр. 28. Проучавање транспорта и сепарације како суве тако и влажне земље на *двоситој платформи* дало би веома интересантне резултате, јер је радни учинак (производност) двоситих платформи знатно већи у односу на једносите.

Исто тако, предност двоситих платформи јесте та што се инерционе силе на ситима међусобно поништавају (јер се сита крећу-осцилују у различитим смеровима при чему су и убрзања на ситима усмерена у супротне стране), па двосите платформе имају знатно тиши и мирнији рад. То значи да би се математички модел који описује рад двоситих платформи састојао од система од две диференцијалне једначине, од којих се једна једначина односи на прво сито, а друга једначина на друго сито.

Такође, један од могућих предлога био би да се испита рад двоситих платформи са различитим положајем погонског ексцентра, при чему је могуће да ексцентар буде смештен изнад решетке (као на слици 3, случај "г") или испод решетке (слика 3, случај "д").

• Један од главних проблема у раду код једноситих осцилаторних транспортних платформи јесте присуство јаких инерционих сила, које је потребно на адекватан начин уравнотежити. У случају наше експерименталне платформе инерционе силе уравнотежавају се помоћу еластичних елемената, тј. четири вишеслојне лиснате опруге (гибња) од опружног челика, које имају могућност подешавања крутости померањем специјалног регулатора дуж опруга. Једним крајем опруга (позиција 7 на слици 4 /стр. 5) чврсто је "зазидана" за решетку, а другим крајем за носећи рам-скелет платформе. Кад се решетка у току осциловања нађе у средњем (равнотежном) положају опруге су недеформисане. При отклону решетке у леву или у десну страну опруге се деформишу (угибају се) и у себи акумулирају потенцијалну енергију, вршећи тако уравнотежење инерционих сила на самој платформи. Међутим, инерциона оптерећења преносе се у потпуности на носећи рам-скелет платформе.

Одређивање потребне рачунске крутости c_r једне (i -те) опруге врши се према [23] на следећи начин (сл. 6 /стр. 9):

$$F^{in} = m_p \cdot a_p = m_p \cdot \omega^2 \cdot A \cdot \cos \omega t = m_p \cdot \omega^2 \cdot |x| \quad [\text{јер је: } |x| = A \cdot \cos \omega t]$$

Максимална инерциона сила у свим опругама биће за $\cos \omega t = 1$, тј. за крајње леви или крајње десни положај платформе, када је очигледно да је $|x_{max}| = A$:

$$F_{max}^{in} = m_p \cdot \omega^2 \cdot A \quad /A\text{-амплитуда осциловања платформе}/$$

Максимална инерциона сила у једној (i -тој) опрузи:

$$F_{i max}^{in} = \frac{F_{max}^{in}}{i} = \frac{m_p \cdot \omega^2 \cdot A}{i} \quad /i\text{-број опруга на које је овешена платформа}/$$

Радна сила (у било ком временском тренутку) у једној (i -тој) опрузи:

$$F_{ri} = c_r \cdot x$$

Максимална радна сила у једној (i -тој) опрузи (за $|x_{max}|=A$):

$$F_{ri\max} = c_r \cdot A$$

Максимална инерциона сила у једној (i -тој) опрузи и максимална радна сила у једној (i -тој) опрузи морају бити у равнотежи, што значи да морају бити једнаке:

$$F_{i\max}^{in} = F_{ri\max}$$

$$\frac{m_p \cdot \omega^2 \cdot A}{i} = c_r \cdot A \quad / : A$$

$$c_r = \frac{m_p \cdot \omega^2}{i} \tag{8.1}$$

Потребна рачунска крутост једне (i -те) лиснате опруге утолико је већа уколико су већи маса платформе (m_p) и кружна фреквенција осциловања платформе (ω), јер се порастом крутости опруга могу прихватити јаче инерционе силе.

Дијаграми уравнотежења инерционих сила једносите осцилаторне платформе помоћу лиснатих опруга према [23] дати су у прилогу П4 /глава 9.

Ово би била класична метода уравнотежења инерционих сила код једносите осцилаторне платформе. Међутим, у литератури [24] постоје препоруке за још две потпуно другачије методе уравнотежавања и то:

- путем дебаланса који се поставља директно на ексцентарском вратилу платформе чиме се анулира инерциона сила свих транслаторно покретних маса, при чему потребна маса дебаланса (m_d) износи:

$$m_d \cdot r_d = m_{red} \cdot A \Rightarrow m_d = m_{red} \frac{A}{r_d} \tag{8.2}$$

m_{red} – редукована маса свих транслаторно покретних делова платформе;

r_d – растојање од центра тежине дебаланса до осе ротације ексцентарског вратила;

A – амплитуда осциловања платформе.

- путем противтегова који се постављају на овесе платформе, према разрађеним готовим шемама уравнотежавања (по систему фирме "Reinstal-Napal", по систему R. H. Gankovera, итд.).

Стога се овом приликом предлаже да се у неком наредном истраживању уместо класичног уравнотежења инерционих сила лиснатим опругама примени уравнотежење путем *дебаланса*, или уравнотежење путем *противтегова*.

• Наша експериментална платформа одликује се хармонијским кретањем радног органа (раоника) за поткопавање земље, код кога се брзине и убрзања мењају по синусном (косинусном) закону, према једначинама (2.1.2) и (2.1.3). Поједини аутори тврде да се при нехармонијском кретању радног органа брзина поткопавања земљишне масе може повећати и до 15%. Стога се предлаже једно оригинално истраживање са платформом чији би радни орган изводио *нехармонијско кретање*, зашта је, по мишљењу аутора ове дисертације, далеко најприкладнија платформа која би уместо механичког поседовала хидраулични погон. Главне одлике, утицајни радни параметри и искуства из експлоатације машина и уређаја са хидрауличним погоном, детаљно су обрађени у одговарајућој литератури и у стручним радовима [49, 50].

• Интересантно би било и једно ново теоријско моделирање у коме би се уместо линеарног применио *нелинеарни математички модел*. Рад са нелинеарним диференцијалним једначинама намеће и неке потпуно другачије критеријуме динамичке анализе и тестирања стабилности проучаваног система. Међутим, на тај начин добијени резултати били би знатно релевантнији, јер је већина реалних појава и процеса у техничким системима ближа нелинеарном, него линеарном понашању.

• У савременим условима време које конструкторима и пројектантима стоји на располагању за израду и испитивање разних машина и уређаја је све краће и краће, што неминовно намеће потребу убрзања и аутоматизације ових процеса. То се пре свега постиже применом савремених рачунарских техника. У питању су првенствено нови рачунарски програми који у себи обједињују више појединачних ставки (прорачун, симулацију рада у различитим условима, базе података са карактеристикама и препорукама за избор материјала, оптимизацију радних параметара, итд.). На овај начин избегавају се дуготрајна и компликована испитивања на класичном прототипу, што знатно утиче на време и трошкове испитивања. Све скупа доводи до повећања сигурности и радне поузданости, као и до подизања свеопштег квалитета овако дизајнираних машина и уређаја.

Зато би у нашем случају било веома интересантно једно ново компјутерско моделирање *са компјутерском симулацијом* процеса сепарације и просејавања влажне земљишне масе кроз решетку платформе, помоћу неког од новијих програма за симулацију и оптимизацију рада техничких система. Овиме би уједно могло да се дође до сазнања које су то критичне вредности појединих утицајних параметара, чијим прекорачењем наступају сметње у раду осцилаторне платформе (или у најекстремнијим случајевима чак и потпуни престанак њеног функционисања). На тај начин избегао би се тотални пад производности осцилаторне платформе, у најекстремнијим радним условима.

Ово су били само неки од могућих предлога и препорука за потенцијална будућа истраживања. Треба свакако напоменути и могућност да пројектанти, конструктори и руковооци машинама које су намењене за сепарацију и просејавање земљишне масе и сами дају мноштво конкретних и интересантних идеја и полазних хипотеза, чија би тачност била верификована у неком новом, наредном истраживању разматране проблематике.

9. ПРИЛОЗИ

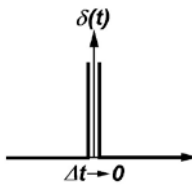
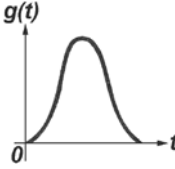
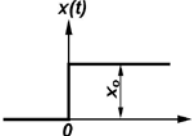
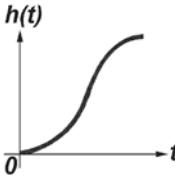
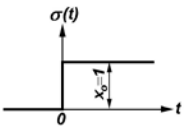
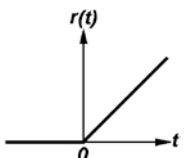
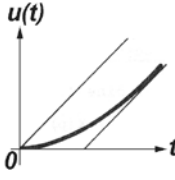
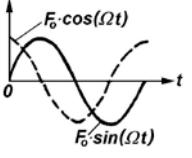
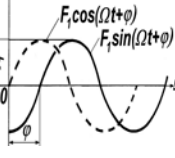
ПРИЛОГ П1. Лапласове трансформације

Р. бр.	$f(t)$ – временски "t"-домен	$F(p)$ – домен комплексне "p"-променљиве
1.	$\frac{df(t)}{dt} = f^{(1)}(t)$	$p \cdot F(p) - f(0^+)$
2.	$\frac{d^2 f(t)}{dt^2} = f^{(2)}(t)$	$p^2 \cdot F(p) - p \cdot f(0^+) - f^{(1)}(0^+)$
3.	$\frac{d^n f(t)}{dt^n} = f^{(n)}(t)$	$p^n \cdot F(p) - p^{n-1} \cdot f(0^+) - p^{n-2} \cdot f^{(1)}(0^+) - \dots - f^{(n-1)}(0^+)$
4.	$\frac{d^n f(t)}{dt^n} = f^{(n)}(t)$ Сви почетни услови једнаки су нули: $f(0^+) = f^{(1)}(0^+) = \dots = f^{(n-1)}(0^+) = 0$	$p^n \cdot F(p)$
5.	$e^{-at} f(t)$	$F(p + a)$
6.	$f(t - \tau)$	$e^{-p\tau} F(p)$
7.	e^{-at}	$\frac{1}{p + a}$
8.	$t^n f(t)$	$(-1)^n \frac{d^n}{dp^n} F(p)$
9.	$\delta(t)$	1
10.	$\sigma(t)$	$\frac{1}{p}$

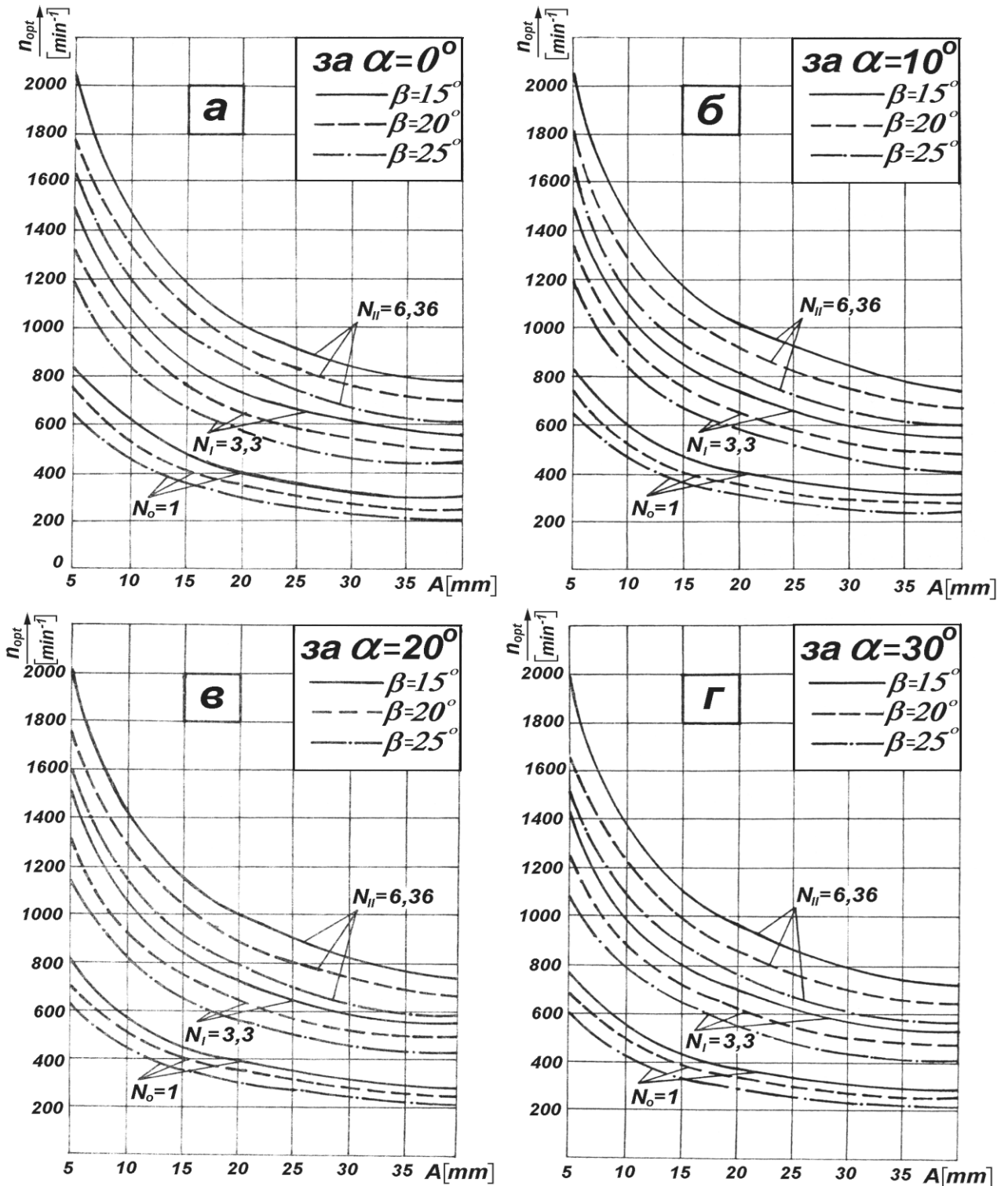
11.	t	$\frac{1}{p^2}$
12.	t^n	$\frac{n!}{p^{n+1}}$
13.	$1 - e^{-at}$	$\frac{a}{p(p+a)}$
14.	$\frac{1}{a}(1 - e^{-at})$	$\frac{1}{p(p+a)}$
15.	$\sum_{k=1}^n \frac{M(p_k)}{N'(p_k)} e^{p_k t}$ $N(p) = (p - p_1) \cdot (p - p_2) \cdots (p - p_n)$	$\frac{M(p)}{N(p)}$
16.	te^{-at}	$\frac{1}{(p+a)^2}$
17.	$t^n e^{-at}$	$\frac{n!}{(p+a)^{n+1}}$
18.	$\frac{1}{(n-1)!} t^{n-1} e^{-at}$	$\frac{1}{(p+a)^n}$
19.	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(p+a) \cdot (p+b)}$
20.	$\frac{1}{a-b}(a \cdot e^{-at} - b \cdot e^{-bt})$	$\frac{p}{(p+a) \cdot (p+b)}$
21.	$\sin at$	$\frac{a}{p^2 + a^2}$
22.	$\sin(at + \phi)$	$\frac{a \cdot \cos \phi + p \cdot \sin \phi}{p^2 + a^2}$
23.	$t \cdot \sin at$	$\frac{2ap}{(p^2 + a^2)^2}$
24.	$\cos at$	$\frac{p}{p^2 + a^2}$

25.	$\cos(at + \phi)$	$\frac{p \cdot \cos \phi - a \cdot \sin \phi}{p^2 + a^2}$
26.	$t \cdot \cos at$	$\frac{p^2 - a^2}{(p^2 + a^2)^2}$
27.	$1 - \cos at$	$\frac{a^2}{p \cdot (p^2 + a^2)}$
28.	$e^{-at} \sin at$	$\frac{a}{(p + a)^2 + a^2}$
29.	$e^{-at} \cos at$	$\frac{p + a}{(p + a)^2 + a^2}$
30.	$\frac{\sin at - at \cdot \cos at}{2a^3}$	$\frac{1}{(p^2 + a^2)^2}$
31.	$\frac{\sin at + at \cdot \cos at}{2a}$	$\frac{p^2}{(p^2 + a^2)^2}$
32.	$\sigma(t - \tau)$	$\frac{1}{p} \cdot e^{-p}$
33.	$(t - \tau) \cdot \sigma(t - \tau)$	$\frac{1}{p^2} \cdot e^{-p}$
34.	Теорема почетних услова: $L[f(t)] = F(p)$	$f(0^+) = \lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} p \cdot F(p), \quad t > 0$
35.	Теорема граничне вредности: $L[f(t)] = F(p)$	$f(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot F(p)$
36.	$\frac{1}{\omega} \cdot e^{-D\omega_0 t} \cdot \sin(\omega t + \phi)$ где је: $\omega = \omega_D = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - D^2}$	$\frac{1}{p^2 + 2 \cdot D \cdot \omega_0 \cdot p + \omega_0^2}$
37.	$K \cdot \left[1 - \frac{1}{\beta} \cdot e^{-D\omega_0 t} \right] \cdot \sin(\omega t + \phi)$, где је: $\beta = \sqrt{1 - D^2}$; $\omega = \omega_D = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - D^2}$; $\phi = \arccos D$	$\frac{K \cdot \omega_0^2}{p \cdot (p^2 + 2 \cdot D \cdot \omega_0 \cdot p + \omega_0^2)}$

ПРИЛОГ П2. Међусобне релације побудних (тест) функција и њихових одзива

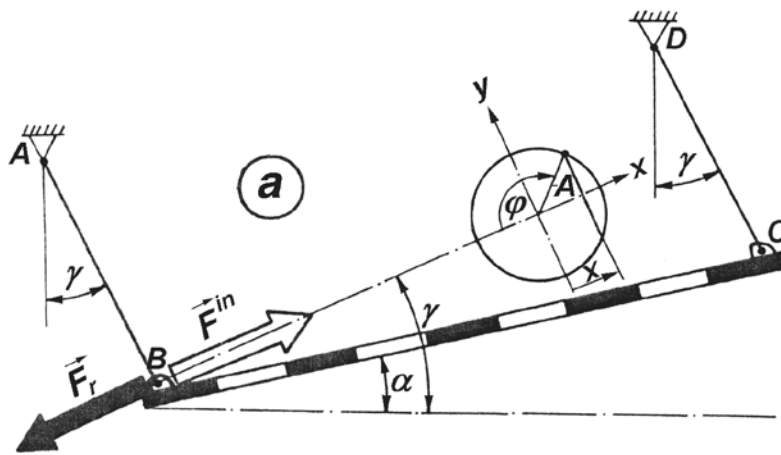
Р. бр.	Назив тест функције	График тест функције	Дефиниција тест функције	Назив функције одзива	График функције одзива	Дефиниција функције одзива
1.	Јединична импулсна (Диракова) функција $\delta(t)$		$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{за } t < 0 \\ \infty, & \text{за } t = 0 \\ 0, & \text{за } t > 0 \end{cases}$ $\int_0^{\infty} \delta(t) dt = 1$	Импулсни одзив $g(t)$		$g(t) = \frac{dh}{dt}$
2.	Одскачна функција $x_0(t)$		$x(t) = \begin{cases} 0, & \text{за } t < 0 \\ x_0, & \text{за } t \geq 0 \end{cases}$	Функција прелаза $h(t)$		$h(t) = \int_0^t g(t) dt$
3.	Јединична одскачна функција $\sigma(t)$		$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & \text{за } t < 0 \\ 1, & \text{за } t \geq 0 \end{cases}$ $\sigma(t) = \int_0^t \delta(t) dt$			
4.	Нагибна функција $r(t)$		$r(t) = \int_0^t \sigma(t) dt = t$	Нагибни одзив $u(t)$		$u(t) = \int_0^t h(t) dt = \int_0^t \int_0^t g(t) dt$
5.	Хармонијска функција $F_0 \sin(\Omega t)$ или: $F_0 \cos(\Omega t)$		$\tilde{x} = F_0 \cdot e^{j\varphi}$ \tilde{x} – фазор дат у комплексном облику	Хармонијски одзив $F_1 \sin(\Omega t + \varphi)$ или: $F_1 \cos(\Omega t + \varphi)$		$\tilde{y} = F_1 \cdot e^{j\varphi}$ \tilde{y} – фазор дат у комплексном облику

ПРИЛОГ ПЗ. Дијаграми за избор оптималних режима рада
осцилаторних транспортних платформи (према [1])

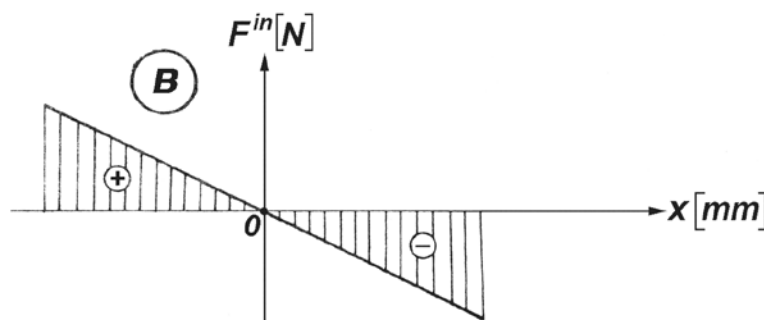
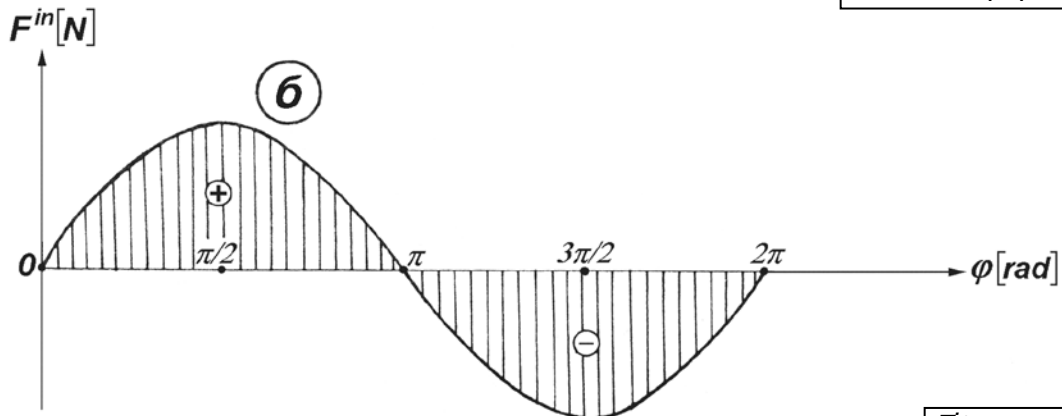


α -угао нагиба платформе према хоризонталу; β -угао транспорта платформе;
 A -амплитуда осциловања платформе; N_o , N_i , N_{ii} -утицајни коефицијенти на
оптимални број обртаја платформе према једначини (2.2.14').

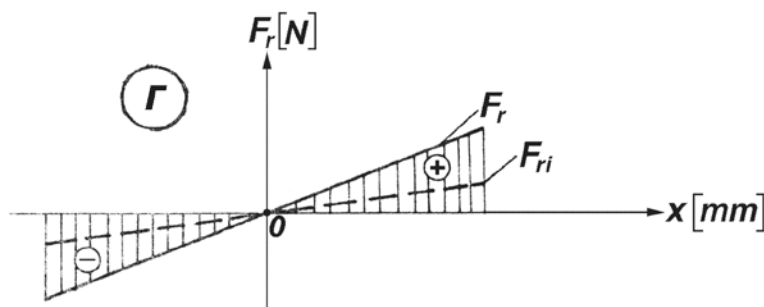
ПРИЛОГ П4. Дијаграми уравнотежења инерционих сила једноситих осцилаторних транспортних платформи (према [23])



φ - фаза осциловања (угао обртања погонског ексцентра);
 A - амплитуда осциловања платформе;
 x - елонгација осциловања платформе;
 A, B, C, D - ослоњачке платформе;
 α, γ - утицајни углови платформе.



F^{in} - укупна инерциона сила у свим опругама;
 F_r - укупна радна сила у свим опругама;
 F_{ri} - радна сила у једној (i-тој) опрузи.



а) анализа сила на платформи; б),в) дијаграми инерционих сила на платформи;
 г) дијаграм радне (уравнотежујуће) силе у опругама.

**ПРИЛОГ П5. Листинг наредби у програмском пакету "MATLAB"
за оптимизацију радних параметара утицајних на сепарацију и
просејавање влажне земљишне масе помоћу
осцилаторне транспортне платформе**

Одзивна површина приказана на слици 27/стр. 88 добијена је поступком оптимизације утицајних параметара применом програмског пакета "MATLAB", коришћењем следећих програмских наредби:

```
format long

clear;

clc;

figure; %% novi dijagram - slika

ose=axes;

x1=[23:0.2:27]; %% granice x ose
w=transpose(x1);

y1=[25:1:45]; %% granice y ose
d=transpose(y1)

z1=[20:2.5:70]; %% granice z ose
Q=transpose(z1);

%%

[xm, ym]=meshgrid(w, d); %% formiranje mreze
for i=1:21,
for j=1:21,
wij=xm(i,j);
dij=ym(i,j);
Qij=Q(i); %% Varijanta Q nije const
% Qij=20 %% Varijanta Q=const (Q=20, 40, 70)
cz=3.26*(10^14)*(dij^0.72)/((wij^10.03)*Qij^0.14);
c(i,j)=cz/100;
end
end
fxy=c;

surf(xm,ym,fxy); %% formiranje dijagrama
view(45,45) %% Definisanje ugla pogleda

set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
```

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Г. Михајловић: *Утврђивање оптималних радних параметара вибрационо-њихајућих осцилаторних платформи са аспекта разбијања и сепарације транспортоване масе*, магистарски рад, Технички факултет, Чачак, 1995.
- [2] M. Olsson: *Analysis of Structures Subjected to Moving Loads*, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1986.
- [3] М. Георгијевић: *Динамика дизалица-експериментална и моделска анализа*, Задужбина Андрејевић, Београд, 1996.
- [4] L. Meirovich: *Dynamics and Control of Structures*, John Wiley and Sons, New York, 1990.
- [5] S. Timoshenko, D. Young, W. Weaver: *Vibration Problems in Engineering*, 4th edition, John Wiley and Sons, New York, 1974.
- [6] Ј. П. Ден Хартог: *Вибрације у машинству*, Грађевинска књига, Београд, 1972.
- [7] H. S. Tzou: *Nonlinear structural dynamics of space manipulators with elastic joints*, International Journal of Analytical and Experimental Model Analysis, 4(1989)117÷123.
- [8] K. Krishnamurthy, M. C. Chao: *Active vibration Control during deployment of space structures*, Journal of Sound and Vibration, 152(1992)205÷218.
- [9] J. F. Jansen, B. L. Burks, S. M. Babcock, R. L. Kress, W. R. Hamel: *Long-reach manipulator for waste storage tank remediation*, ASME DSC-Modeling and Control of Compliant and Rigid Motion Systems, 31(1991)67÷73.
- [10] Z. Yang, J. P. Sadler: *Large-displacement finite element analysis of flexible linkage*, ASME Journal of Mechanical Design, 112(1990)175÷182.
- [11] A. Suprem, N. Mahalik, K. Kim: *A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector*, Computer Standards & Interfaces, 35(4)(2013)355÷364.
- [12] В. М. Агеев, В. К. Ростоцкиј: *Машини и оборудованије дља селскогo строителства*, Машгиз, Москва, 1973.
- [13] Г. Гарбок: *Грађевинске машине и грађење*, Грађевинска књига, Београд, 1983.
- [14] Б. Зечевић: *Прилог истраживања ефективности постројења за гравитацијску концентрацију магнетита*, магистарски рад, Технички факултет, Чачак, 1988.
- [15] *Tekniken*, Focus International Book Produktion, Stockholm, 1984.

- [16] W. Beenken, E. Gock, K. Kurrer: *The outer mechanics of the eccentric vibration mill*, International Journal of Mineral Processing, ISSN 0301-7516, Vol. 44÷45 (March 1996), pp. 437÷446.
- [17] K. N. Dewangan, V. K. Tewari: *Characteristics of hand-transmitted vibration of a hand tractor used in three operational modes*, International Journal of Industrial Ergonomics, ISSN 0169-8141, Vol. 39, Issue 1 (January 2009), pp. 239÷245.
- [18] C. Kim, C. Park: *Modelling vibration transmission in the mechanical and control system of a precision machine*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, ISSN 0007-8506, Vol. 63, Issue 1 (2014), pp. 349÷352. ISSN 0007-8506.
- [19] E. I. Shemyakin, N. P. Benevolenskaya, A. Ya. Tishkov: *Vibration machines and man*, Studies in Environmental Science, ISSN 0166-1116, Vol. 13, Elsevier, (1981), pp. 348÷352.
- [20] G. M. Krolczyk, J. B. Krolczyk, S. Legutko, A. Hunjet: *Effect of the disc processing technology of the vibration level of the chipper during operations*, Tehnički vjesnik, 21, 2(2014), 447÷450.
- [21] M. Klanfar, T. Kujundžić, D. Vrkljan: *Calculation analysis of bulldozer's productivity in gravitational transport on open pits*, Tehnički vjesnik, 21, 3(2014), 517÷523.
- [22] Д. Голубовић: *Високофреквентна вибрационо-њихајућа вадилица кромпира-тип VWK-10*, развојно-истраживачки пројекат, Технички факултет, Чачак, 1994.
- [23] Д. Голубовић, Г. Михајловић: *Уравнотежење инерцијалних сила вибрационо-њихајућих платформи помоћу лиснатих опруга*, ISSN 0354-9844, UDK: 621(082), Зборник радова бр. 12, стр. 9÷14, Технички факултет, Чачак, 1999.
- [24] Н. А. Корпенко: *Сельскохозјајственије машини*, Колос, Москва, 1973.
- [25] Д. Голубовић: *Високофреквентна вибрационо-њихајућа вадилица кромпира-тип VWK-20*, развојно-истраживачки пројекат, Технички факултет, Чачак, 1997.
- [26] Н. Здравковић, М. Гашић, М. Савковић: *Analytical Form for Total Static Deflection of the Articulated Boom of the Mobile Elevating Work Platform*, IMK-14-Research& Development, Vol. 19, No 1, pp 21÷28, 2013.
- [27] Д. Голубовић: *Динамика система • Стабилност управљања аутомобила*, монографија, Технички факултет, Чачак, 1990.
- [28] Д. Симић: *Основи аутоматског управљања*, Грађевинска књига, Београд, 1984.
- [29] L. B. Barrentine: *An introduction to design of experiments: A simplified approach*, American Society for Quality (ASQ) Press, Milwaukee, Wisconsin, USA, 1999.
- [30] G. E. P. Box, K. B. Wilson: *On the experimental attainment of optimum conditions*, Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 13(1)(1951)1÷45.
- [31] D. C. Montgomery: *Design and analysis of experiments*, 8th Edition, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2012.
- [32] R. H. Myers, D. C. Montgomery, G. G. Vining, C. M. Borrer, S. M. Kowalski: *Response surface methodology: A retrospective and literature review*, Journal of Quality Technology, 36(1)(2004)53÷77.
- [33] K. Chomsamutr, S. Jongprasithporn: *Optimization parameters of tool life model using the Taguchi approach and response surface methodology*, International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), 9(3)(2012)120÷125.

- [34] P. Dašić: *Comparative analysis of different regression models of the surface roughness in finishing turning of hardened steel with mixed ceramic cutting tools*, Journal of Research and Development in Mechanical Industry, 5(2)(2013)101÷180.
- [35] H. M. Ibrahim, E. E. Elkhidir: *Response surface method as an efficient tool for medium optimisation*, Trends in Applied Sciences Research, 6(2)(2011)121÷129.
- [36] M. Subramanian, M. Sakthivel, K. Sooryaprakash, R. Sudhakaran: *Optimization of end mill tool geometry parameters for Al7075-T6 machining operations based on vibration amplitude by response surface methodology*, Measurement, 46(10)(2013)4005÷4022.
- [37] M. J. Dalvand, S. S. Mohtasebi, S. Rafiee: *Modeling of electrohydrodynamic drying process using response surface methodology*, Food Science&Nutrition, 2(3)(2014)200÷209.
- [38] I. R. Amado, D. Franco, M. Sánchez, C. Zapata, J. A. Vázquez: *Optimisation of antioxidant extraction from Solanum tuberosum potato peel waste by surface response methodology*, Food Chemistry, 165(2014)290÷299.
- [39] R. N. Edmondson: *Agricultural response surface experiments based on four-level factorial designs*, Biometrics, 47(4)(1991)1435÷1448.
- [40] P. S. Madamba: *The response surface methodology: An application to optimize dehydration operations of selected agricultural crops*, LWT – Food Science and Technology, 35(7)(2002)584÷592.
- [41] М. Гашић, М. Савковић, Р. Булатовић, Р. Петровић: *Optimization of a pentagonal cross section of the truck crane boom using Lagrange's multipliers and differential evolution algorithm*, Meccanica, (2011)46, 845÷853, DOI:10.1007/s1 1012-010-9343-7, [M₂₂].
- [42] М. Гашић, М. Савковић, Р. Булатовић: *Optimization of trapezoidal cross section of the truck crane boom by Lagrange's multipliers and by differential evolution algorithm (DE)*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 57(2011)4, 304÷312, DOI: 10.5545/sv-jme.2008.029, [M₂₃].
- [43] М. Савковић, М. Гашић, Д. Ћатић, Р. Николић, Г. Павловић: *Optimization of the box section of the main girder of the bridge crane with the rail placed above the web plat*, Structural and Multidisciplinary Optimization, (2012), DOI:10.1007/s00158-012-0813-5, [M₂₁].
- [44] Ј. Станков: *Основи мерне технике-методе планирања експеримента*, ФТН, Нови Сад, 1982.
- [45] Г. Михајловић, Д. Голубовић: *Разбијање чврсте масе помоћу вибрационо-њихајуће осцилаторне платформе*, XXI Међународни симпозијум "Савремена пољопривреда", ISSN 0350-1205, UDK.531.3, стр. 231÷236, Технички и Агронормски факултет, Чачак, 1998.
- [46] Г. Михајловић, Д. Голубовић: *Mechanical modelling and dynamical analysis of the process of solid mass transport on vibrato-oscillating platform*, 5th International Conference RaDMI 2005, ISBN 86-83803-20-1, pp198÷202, Врњачка Бања, 2005.
- [47] Г. Михајловић, М. Гашић, М. Савковић, С. Митровић, Б. Тадић: *Modelling of vibratory platforms from tribological aspect*, Friction and Wear Journal, ISSN 1330-3651 (Print), ISSN 1848-6339 (Online), 2017.

-
- [48] Г. Михајловић, М. Гашић, М. Савковић: *Dynamical modelling of the process of separation and sieving of wet land mass by oscillatory transporting platform*, IMK-14-Research and Development in Heavy Machinery, 20(2014)1, EN9÷18, UDC 621, ISSN 0354-6829.
- [49] Р. Петровић, Г. Михајловић, Љ. Ђуричић: *Experimental research and analysis of working and constructive parameters of hydro pumps with constant pressure and variable flow*, The third international workshop on aircraft system technologies, march 31÷april1, ISBN 978-3-8322-8071-0, pp105÷112, Hamburg, Germany, 2011.
- [50] Д. Ђатић, М. Гашић, М. Савковић, М. Глишовић: *Analysis of hydraulic power-steering system*, International Journal of Vehicle Design, [M23].
<http://www.inderscience.com/browse/index.php?journalID=31&action=coming>
-