



ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЕКОМІРА У ДИНАМІЧНО ЗМІНЮВАНИХ УМОВАХ ВИМІРЮВАНЬ

В. Тюрін, аспірант,

Ю. Мачехін, доктор технічних наук, завідувач кафедри,
Харківський національний університет радіоелектроніки

Представлено результати лабораторних досліджень і натурних випробувань лазерного вимірника відстаней в умовах динамічних змінень положення об'єкта й рівня фону. Проведено аналіз впливу різних факторів на процес вимірювання відстаней. Наведено порівняльні оцінювання точності вимірювання відстаней для різних динамічних характеристик об'єкта й фону.

Results of laboratory tests and field tests of laser distance meter in condition of dynamic changed object position and background level are presented. Various factors impact on measuring distances process is analysed. Comparative accuracy estimations of distances measurement for different dynamic characteristics of object and background are rendered.

ІЗ моменту прийняття XVII Генеральною конференцією у 1983 році нового визначення метра, заснованого на визнанні швидкості світла у вакуумі як фізичної константи, основним методом вимірювання відстаней стали методи вимірювання часу поширення електромагнітних хвиль між двома просторовими точками. Найбільш успішним способом реалізації цих методів є використання лазерного імпульсного випромінювання. Практично всі високоточні засоби вимірювання відстаней базуються на пристроях, що вимірюють час проходження лазерного імпульсу між просторовими точками. Чим вище точність вимірювання імпульсних лазерних далекомірів, тим вищі вимоги до форми імпульсів, змінення інтенсивності випромінювання й системи реєстрації імпульсів. Від усіх цих параметрів залежить вимірюваний часовий інтервал і, відповідно, вимірювана відстань.

Однією із відмінних рис сучасного етапу розвитку лазерних далекомірних пристроїв є їхня мініатюризація й широка інтеграція до різних роботизованих вимірювальних систем і дистанційних систем автоматизованого керування [1]. До таких систем належать мобільні лазерні тривимірні сканери, роботизовані навігаційні платформи, пристрої автоматичного зближення й стикування об'єктів, бортові прилади картографування місцевості, багатофункціональні дистанційні вимірники промислового й військового призначення й багато інших.



В. Тюрін



Ю. Мачехін

У цих системах інформацію стосовно відстані до об'єкта одержують за допомогою компактних напівпровідникових лазерних далекомірів, що здійснюють високошвидкісні вимірення в умовах динамічних змін просторового положення об'єктів і рівня фону. У таких умовах спостерігаються істотні флуктуації амплітуди, спотворення форми й збільшення тривалості імпульсів, що приймаються, а також варіації рівня шуму в широкому діапазоні [2]. Це призводить до випадкового зсуву моменту спрацьовування часових дискримінаторів, зменшення відношення сигнал/шум і погіршення чутливості фотоприймального пристрою, що обумовлює появлення додаткових випадкових помилок вимірювань і зниження максимальної дальності дії лазерних далекомірів [3].

Для зниження впливу цих факторів авторами розроблено методи [4, 5] і моделі пристроїв [6, 7], засновані на адаптивному керуванні параметрами приймального тракту відповідно до динамічно змінюваних умов вимірювань і подальшої компенсації помилок вимірювань у реальному масштабі часу за допомогою коректувальних таблиць.

У зв'язку із цим актуальним стало завдання проведення експериментальних досліджень зазначених методів і пристроїв із метою оцінення ефективності зниження помилок вимірювань в умовах динамічних змін просторового положення об'єкта й рівня фону. Було розроблено макет лазерного вимірника відстаней, що складається із передавального, приймального й обчислювального модулів. Експериментальні дослідження склалися із двох етапів. На першому проводили дослідження у лабораторних умовах. На другому — натурні випробування макета лазерного вимірника відстаней на реальній каліброваній трасі в умовах турбулентної атмосфери й змінюваного фону.

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТА ЛАЗЕРНОГО ВИМІРНИКА ВІДСТАНЕЙ

Метою лабораторних досліджень макета лазерного вимірника відстаней було встановлення ступеня відповідності вимірених значень дальності до поверхні об'єкта й значень каліброваної дальності в умовах динамічного змінення просторового положення об'єкта й рівня фону. Імітація динамічних змін просторового положення здійснювалася обертанням об'єкта з неоднорідною неплоскою поверхнею, а імітацію змін величини фонового випромінювання було реалізовано за допомогою керування рівнем яскравості потужних освітлювальних ламп.

Методика експериментальних досліджень полягала у послідовному проведенні вимірювань відстані до локальних областей із різними коефіцієнтами відбиття й кутами нахилу профілю поверхні протяжного обертового об'єкта за умови різних рівнів фонового випромінювання й порівняння отриманих даних із відмітками каліброваної дистанції.

Для реалізації лабораторних досліджень було розроблено експериментальну установку, структурну схему якої представлено на рис. 1.

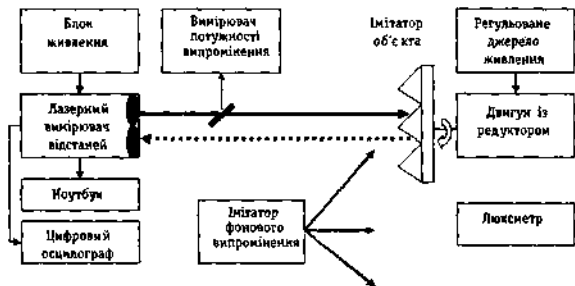


Рис. 1. Структурна схема експериментальної установки

Характеристики елементів експериментальної установки представлено у табл. 1.

Зовнішній вигляд експериментальної установки представлено на рис. 2.

Зовнішній вигляд макета лазерного вимірника відстаней представлено на рис. 3.

Зондувальне випромінювання формувалося передавальним модулем макета лазерного вимірника відстаней, який було встановлено на двокоординатній трикозі. Як джерело використовувався імпульсний лазерний діод, що випромінює на довжині хвилі 905 нм із піковою потужністю 75 Вт і частотою повторення імпульсів 2 кГц. Частина випромінювання відгалужувалася оптичним роздільником для вимірювання вихідної потужності. Крім цього, оптичний канал передавального модуля містив набір нейтральних світлофільтрів із метою імітації атмосферного ослаблення.

Лазерне випромінювання направлялося на імітатор протяжного об'єкта. Наведення випромінювання на об'єкт здійснювалося за допомогою ПЗС камери. Об'єкт являв собою обертовий диск і локально неоднорідними областями відбиття і деформованим у вигляді трикутних ребер профілем поверхні (рис. 4, а, б).

Локальні відмінності коефіцієнтів відбиття різних областей диска дозволили імітувати флуктуації амплітуди сигналів, що приймаються, а наявність трикутних ребер на поверхні диска дало можливість імітувати ефект розширення імпульсів за умови злучення

лазерної плями на бічні грані. Крім цього, короткі дистанції між джерелом випромінення й об'єктом обумовили можливість імітації ефекту спотворення форми імпульсів, що приймаються, у режимі амплітудного обмеження підсилювального каскада. Змінення куткової швидкості обертання диска здійснювалося за допомогою регульованого джерела живлення двигуна.

Таблиця 1. Характеристики елементів експериментальної установки

Лазерний вимірник відстані	Передавальний модуль:
	<ul style="list-style-type: none"> • лазерний діод — SPL PL90_3 • довжина хвилі — 905 нм • пікова потужність лазерного випромінення — 75 Вт • розходимість випромінення — 3 мрад
	Приймальний модуль:
	<ul style="list-style-type: none"> • діаметр об'єктива — 30 мм • інтерференційний фільтр — 905 нм ± 10 нм • лавинний фотодіод S2382
	Обчислювальний модуль:
	<ul style="list-style-type: none"> • часове розділення ИВИ (TDC GP2) — 65 пс • мікроконтролер PIC18F258
Блок живлення	Стабілізоване джерело живлення 12 В
Оптичний роздільник променя	Коефіцієнт відбиття — 0,3
Вимірник потужності оптичного випромінювання	PM120 (THORLABS)
Імітатор об'єкта	<ul style="list-style-type: none"> • диск із неоднорідною, неплоскою поверхнею • двигун із редуктором • регульоване джерело живлення
ПЗС камера	EVI-D31 (SONY)
Імітатор фонового випромінення	Потужна освітлювальна лампа 150 Вт із пристроєм керування яскравістю
Люксметр	RO-1332 (PIERRON ROLINE)
Ноутбук	HP Compaq nc6220
Цифровий осцилограф	TDS 3044B (TEKTRONIX)
Калібрована дистанція	0—7 м

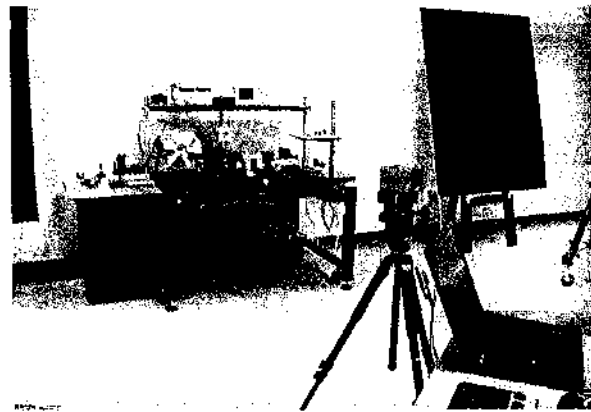


Рис. 2. Зовнішній вигляд експериментальної установи

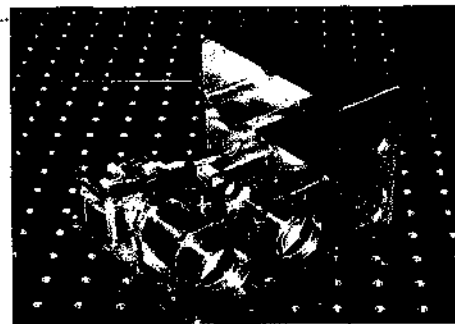


Рис. 3. Зовнішній вигляд макета лазерного вимірника відстані

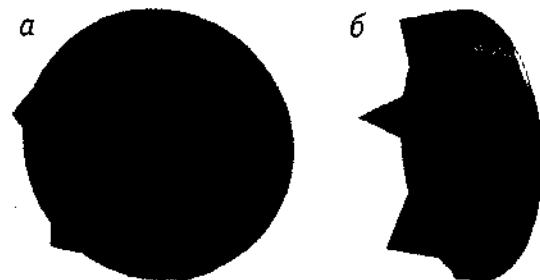


Рис. 4. Імітатор об'єкта (а, вид спереду), (б, вид збоку)

Відбите від об'єкта лазерне випромінення попадає на об'єктив приймального модуля. Приймальний модуль складався із лавинного фотодіода, двокаскадного підсилювального тракту, що включає трансімпедансний підсилювач і підсилювач напруги, а також компаратора. Прийнятий сигнал із виходу підсилювача напруги фіксувався широкосмуговим цифровим осцилографом. Крім цього, на осцилограф надходив сигнал із виходу компаратора для контролю моменту формування СТОП-імпульсу, який зупиняв рахунок у вимірнику часових інтервалів. Осцилограми прийнятого сигналу й СТОП-імпульсу представлено на рис. 5.

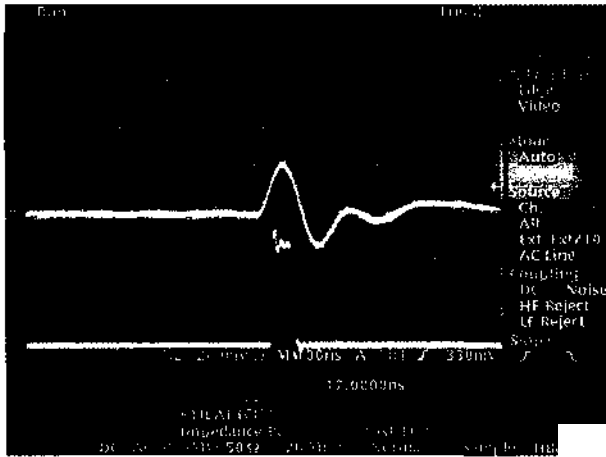


Рис. 5. Осцилограми прийнятого сигналу й СТОП-іде g l — рад/с l довжина відповдно нитки нака-

Для імітації фонового випромінення застосовувалася потужна освітлювальна лампа. Яскравість фонового випромінення змінювалася за допомогою регульованого джерела живлення лампи. При цьому освітленість на імітаторові об'єкта розраховувалася у відповідності з таким виразом:

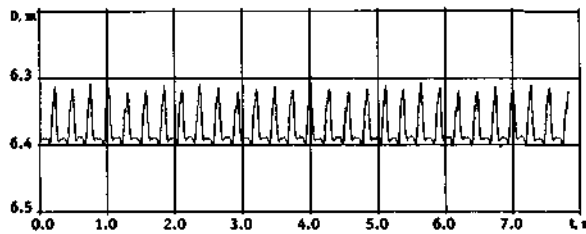
$$E = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot \Omega}{S \cdot \omega} \quad (1)$$

де E — освітленість, створювана освітлювальною лампою на об'єкті; U — напруга живлення освітлювальної лампи; I — струм освітлювальної лампи; η — коефіцієнт світлової втрати; Ω — тисесний кут, формований оптичною системою освітлювальної лампи; ω — тисесний кут випромінення нитки накалювання лампи; S — площа поверхні нитки накалювання лампи.

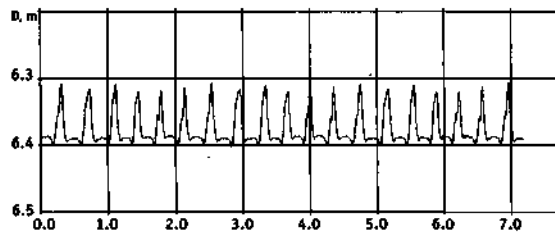
$$\delta = 2 - n - z - l, \quad (2)$$

лювання лампи.

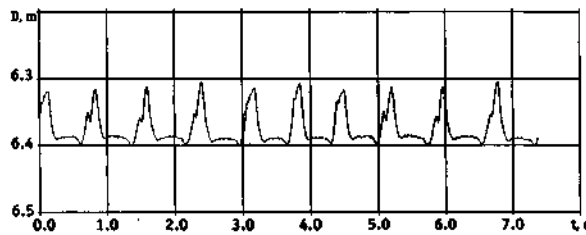
Щод час проведення експериментальних досліджень змшення освітленості на об'єкті контролювалося за допомогою люксметра. Поточні значення виміреної дальності до об'єкта надходили в



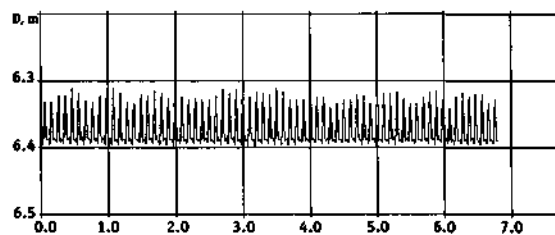
а, $E = 5000$ лк, $\rho = 0,7$, $\omega = 210$ град/с



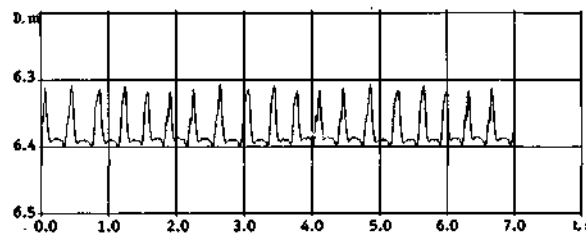
б, $E = 10000$ лк, $\rho = 0,6$, $\omega = 120$ град/с



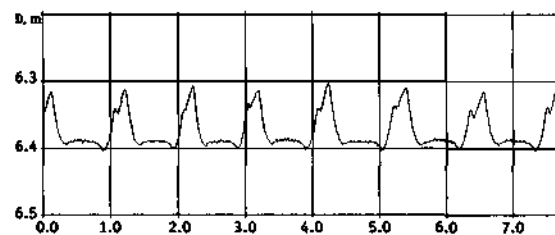
в, $E = 15000$ лк, $\rho = 0,5$, $\omega = 70$ град/с



г, $E = 20000$ лк, $\rho = 0,4$, $\omega = 580$ град/с



д, $E = 25000$ лк, $\rho = 0,3$, $\omega = 150$ град/с



е, $E = 30000$ лк, $\rho = 0,2$, $\omega = 50$ град/с

Рис. 6. Результати вимірення відстані

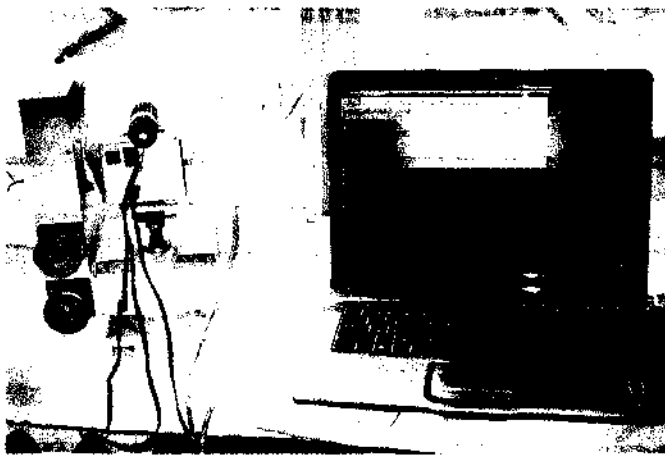


Рис. 8. Загальний вигляд установки для натурних випробувань

На рис. 8 представлено загальний вигляд установки для натурних випробувань макета.

Випробування проводилися на лінійному базисі. Лінійний базис складався із 3 каліброваних дистанцій, наприкінці яких установлювалися триптель-призми із діаметром 50 мм. Калібрування дистанцій здійснювалося за допомогою тахеометра TCR 1201 + R400 з точністю $\pm 0,5$ мм (свідцтво про метрологічну атестацію № 7520 від 31.12.2008). Експериментальний зразок лазерного вимірника відстаней установлювався на юстирувальному столику й приєднувався до ноутбука. Наведення здійснювалося за допомогою візира. Дані вимірювань фіксувалися на ноутбуці й індикаторі експериментального зразка.

Таблиця 3.
Результати натурних випробувань макета

Лінійний базис	Калібрована дальність (тахеометр TCR 1201 + R400), м	Вимірена дальність (експериментальний зразок), м	Середньоквадратичне відхилення (СКВ) результатів вимірень, см
Лінія 1	54,6967	54,700	± 1
Лінія 2	179,6445	179,640	± 1
Лінія 3	392,0963	392,090	± 1

Отримані результати представлено у табл. 3.

Максимальна дальність вимірювання відстаней експериментальним зразком складала $419,690 \pm 0$ м.

ВИСНОВОК

Отже, результати лабораторних досліджень і натурних випробувань показали, що в умовах динамічних змінень просторового положення протяжного об'єкта й варіацій рівня фонового випромінення макет лазерного вимірника відстаней забезпечує точність вимірювання дистанції ± 1 см. При цьому максимальна дальність вимірювання відстані складала 419,690 м. ■

ЛІТЕРАТУРА

1. D. M. Cole, P. M. Newman. Using Laser Range Data for 3D SLAM in Outdoor Environments. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotic and Automation (ICRA-06), Orlando, Florida, USA, May 2006.
2. Anita C. Brenner, H. Jay Zwally and others. Derivation of Range Distributions from Laser Pulse Waveform Analysis for Surface Elevations, Roughness, Slope, and Vegetation Heights. Geosciences Laser Altimeter System (GLAS). Algorithm Theoretical Basis Document. Version 4.1. NASA Goddard Space Flight Center, September 2003.
3. Вильнер В., Ларюшин А., Рудь Е. Методы повышения точности импульсных лазерных дальномеров // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2008. — № 3. — С. 118—123.
4. Быков М. М., Грищенко Л. В., Тюрин В. С., Тюрин С. В. Оценка точности измерения расстояний полупроводниковым лазерным дальномером // Український метрологічний журнал. — 2007. — № 1. — С. 26—29.
5. Тюрин В. С., Мачехин Ю. П. Формирование адаптивного порога полупроводникового лазерного дальномера в условиях изменяющегося фонового излучения // Прикладная радиоэлектроника. — 2009. — № 1. — С. 86—89.
6. Быков М. М., Тюрин В. С., Тюрин С. В. Моделирование процесса формирования сигналов в импульсном полупроводниковом лазерном дальномере // Радиоэлектроника и информатика. — 2006. — № 4 (35). — С. 11—15.
7. Тюрин В. С., Мачехин Ю. П. Модель импульсного полупроводникового лазерного дальномера // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. — 2008. — № 142. — С. 22—29.

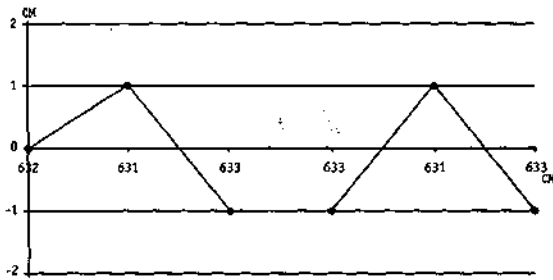


Рис. 7. Помилки вимірювання відстані

комп'ютер для зберігання, аналізу й візуалізації даних.

Результати вимірень відстані до поверхні імітатора обертового об'єкта, отримані за умови різних значень освітленості фонового випромінювання (E), коефіцієнта відбиття (ρ) і кутової швидкості обертання диска (ω), представлено на рис. 6, а—е.

Аналіз отриманих результатів показав, що з урахуванням відмінностей реальних висот ребер вимірені значення відстані до вершини або грані будь-якого із шести ребер повторюються із високою точністю. Так, вимірене значення відстані до вершини першого на графіку ребра склало 6 м 32 см. Це значення повторюється через кожні п'ять ребер із точністю ± 1 см. При цьому змінення характеристик освітленості фону, коефіцієнта відбиття поверхні й кутової швидкості обертання диска не призводять до погіршення точності вимірювань.

Особливістю лабораторних досліджень було те, що параметри обертового диска вносили додаткові помилки до цих вимірювань, пов'язані з неідентичністю розмірів ребер і нерівномірністю обертання вала двигуна, а також неточністю установки й вібрацією диска на валу.

Отримані у ході лабораторних вимірювань значення дальності до вершини одного із шести ребер поверхні імітатора об'єкта й значення каліброваної дальності було зведено в одну табл. 2.

На графіку рис. 7 представлено помилки вимірювання відстані до вершини першого ребра поверхні імітатора об'єкта за умови варіацій освітленості фону в діапазоні 5000—30 000 лк, змінень коефіцієнта відбиття поверхні об'єкта у діапазоні 0,2—0,7 і кутової швидкості обертання диска у діапазоні 50—580 град/с.

Аналіз результатів лабораторних досліджень показав, що лазерні вимірювання відстані в умовах динамічних змінень просторового положення протяжного об'єкта й істотних варіацій рівня фонового випромінювання здійснюються з точністю ± 1 см.

НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ МАКЕТА ЛАЗЕРНОГО ВИМІРНИКА ВІДСТАНЕЙ

Метою натурних випробувань було установлення максимальної дальності дії макета лазерного вимірника відстаней і порівняльне оцінення точності визначення дистанції до стандартних відбиваючих об'єктів, розташованих на каліброваних трасах, в умовах турбулентної атмосфери і варіацій освітленості. Для реалізації цих випробувань використовувалася стандартна калібрована траса на території ННЦ «Інститут метрології» (м. Харків).

У випробуваннях макета лазерного імпульсного напівпровідникового вимірника відстаней використовувалося таке устаткування:

- лінійний базис;
- тахеометр TCR 1201 +R400 (Leica, Швейцарія);
- ноутбук;
- юстувальний столик;
- візир (7 × 18);
- експериментальний зразок лазерного вимірника відстаней.

Умови випробувань:

- ▶ дата: 12.08.2009;
- ▶ час: 10:20;
- ▶ температура повітря: 220 °С;
- ▶ освітленість: 103 000 лк;
- ▶ тиск: 748 мм рт. ст.;
- ▶ вологість: 46 %.

Таблиця 2. Результати лабораторних вимірень

Умови вимірювань	Вимірені значення дальності, м	
	Експериментальна установка	Калібрований засіб
$E = 5000$ лк $\rho = 0,7$ $\omega = 210$ град/с	6,32	6,32
$E = 10000$ лк $\rho = 0,6$ $\omega = 210$ град/с	6,31	6,32
$E = 15000$ лк $\rho = 0,5$ $\omega = 210$ град/с	6,33	6,32
$E = 20000$ лк $\rho = 0,4$ $\omega = 210$ град/с	6,33	6,32
$E = 25000$ лк $\rho = 0,3$ $\omega = 210$ град/с	6,31	6,32
$E = 30000$ лк $\rho = 0,2$ $\omega = 210$ град/с	6,33	6,32