

УДК 000.31:621.3.049.77

Осадчий В. В., канд. техн. наук
Назарова Е. С., канд. техн. наук
Брылистый В. В.,
Савилов Р.И.

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМАССОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Аннотация. Создан программно-аппаратный комплекс для отладки и оценки эффективности алгоритмов управления двухмассовыми электроприводами, позволяющий снизить трудоемкость разработки систем управления для практических применений. Проведено исследование алгоритма управления позиционным электроприводом двухмассовой системы. Показано, что формирование траектории движения первой массы на основе априорных знаний об объекте управления позволяет получить заданную траекторию движения исполнительного механизма.

Ключевые слова: лабораторный стенд, микропроцессор, математическое моделирование, двухмассовая система, разомкнутая система управления, позиционный электропривод.

Осадчий В. В., канд. техн. наук
Назарова О. С., канд. техн. наук
Брилистий В. В.,
Савілов Р. І.

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВОМАСОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Анотація. Створено програмно-апаратний комплекс для від лагодження та оцінки ефективності алгоритмів керування двомасовими електроприводами, який дозволяє зменшити трудомісткість розроблення систем керування для практичного використання. Проведено дослідження алгоритму керування позиційним електроприводом двомасової системи. Показано, що формування траєкторії руху першої маси на основі апріорних знань про об'єкт керування дозволяє отримати задану траєкторію руху виконавчого механізму.

Ключові слова: лабораторний стенд, мікропроцесор, математичне моделювання, двомасова система, розімкнута система керування, позиційний електропривод.

Osadchiy V. V., PhD,
Nazarova Ye. S., PhD
Brilistii V. V.,
Savilov R. I.

LABORATORY STAND FOR RESEARCHING OF MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEMS OF DUAL-MASS ELECTRIC DRIVE

Abstract. Creates a software and hardware system for debugging and evaluating the effectiveness of the two-mass control of electric drives algorithms, which allows reduce labor intensity the development of control systems for practical applications. The investigation was conducted for control algorithm of positional two-mass electric drive. It is shown that the formation of the trajectory of the first mass based on a priori knowledge of the control object allows you to get the desired trajectory of the actuator movement.

Key words: laboratory stand, microprocessor, mathematical simulation, two-mass system, open-loop control system, positional electric drive.

Введение.

Основной задачей проектирования современных автоматизированных электроприводов является точное воспроизведение заданных законов движения исполнительных механизмов.

Практическая реализация высоких динамических показателей регулируемых электроприводов по точности, диапазону регулирования, быстродействию требует учета

специфических свойств управляемых преобразователей, структурных и параметрических отклонений, взаимосвязи и взаимовлияния процессов в электромеханической и упругой механической системах.

Динамические процессы взаимодействия электромеханической и упругой механической систем электропривода в полной мере выявляются при представлении механиче-

ской части электропривода двухмассовой схемой [1].

С развитием микропроцессорной и полупроводниковой техники появляются новые алгоритмы управления двухмассовыми системами, которые необходимо проверять, отлаживать и оценивать эффективность их применения.

Наряду с замкнутыми системами управления положением существует ряд устройств, таких как подъемные краны, лифты, различного рода манипуляторы, для которых наличие упругих связей приводит к возникновению колебаний и не позволяет точно определить положение исполнительного механизма на основании координат электропривода. В тоже время установка датчиков обратной связи, измеряющих непосредственно координату исполнительного механизма, затрудняется ввиду конструктивных особенностей указанных устройств.

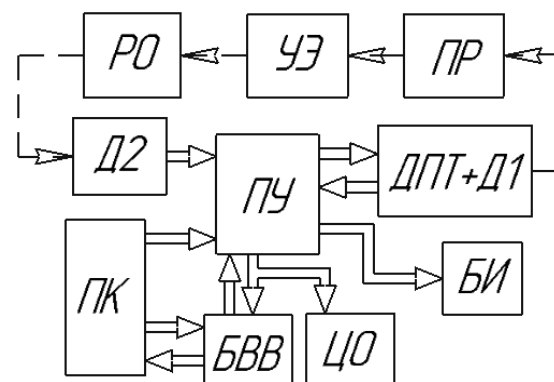
Поэтому актуальной является разработка универсального лабораторного стенда, позволяющего исследовать алгоритмы управления двухмассовыми электроприводами при изменении момента инерции и статического момента сопротивления как для замкнутых, так и для разомкнутых систем управления.

Цель - создание программно-аппаратного комплекса для отладки и исследования систем управления двухмассовыми электроприводами, состоящего из экспериментальной установки и имитационной модели.

Материалы и результаты исследований. Для синтеза и анализа электромеханических систем широко используются различного рода лабораторные комплексы [2-4]. В ходе исследования был разработан лабораторный стенд, структурная схема и внешний вид которого представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Основными элементами стенда являются: ПУ – плата управления, реализованная на базе микроконтроллера ADuC841; ДПТ+Д1 – двигатель постоянного тока с датчиком угла поворота, представляющий собой приводной модуль LEGO NXT с интегрированным редуктором и инкрементным энкодером; ПР – понижающий редуктор с передаточным отношением 1:3, который собран из элементов

зубчатой передачи конструктора LEGO NXT; УЭ – упругий элемент – металлическая витая пружина, соединяющая редуктор с рабочим органом (РО) в виде металлической пластины с отверстиями для болтов М10; Д2 – инкрементный энкодер второй массы, используемый для сопоставления реального переходного процесса с моделируемым и подтверждения адекватности математической модели физическому объекту; БВВ – блок ввода-вывода, представленный платой аналогового ввода-вывода PCI-1711U, предназначенной для связи со средой математического моделирования; БИ – блок индикации для отображения текущих значений положения двигателя и исполнительного механизма; ЦО – цифровой осциллограф.



==> - электрические связи

- -> - механические связи

Рис. 1. Структурная схема стенда

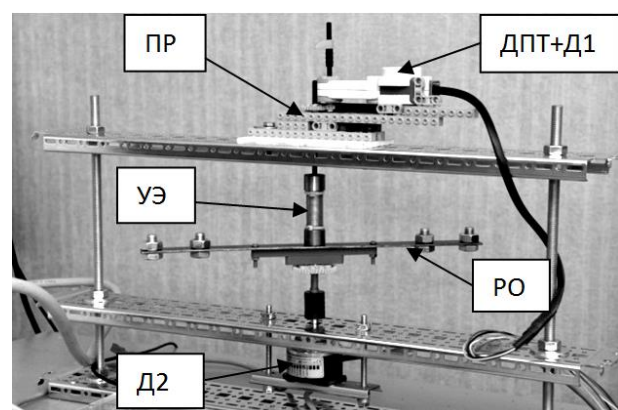


Рис. 2. Фото механической части стенда

В качестве примера использования лабораторного стенда проведено исследование позиционного электропривода [9]. При этом в рамках разомкнутой двухмассовой

системы реализована замкнутая одномассовая системы, которая обеспечивает рассчитанную на основании априорных знаний траекторию движения первой массы с целью получения требуемой траектории движения второй массы. Указанная замкнутая система является следящим электроприводом.

Синтез алгоритма управления состоит из двух этапов. На первом этапе формируется желаемая траектория второй массы с учетом ограничений по рывку, ускорению и скорости. Второй этап заключается в определении траектории движения первой массы на основании известных жесткости упругого звена и момента инерции. Моменты времени, в которые меняется задающее воздействие по рывку, определяются в соответствии с приведенными выражениями (1).

$$\begin{cases} t_2 = t_1 + \frac{\varepsilon_{\max}}{j_{\max}}; & t_3 = t_1 + \frac{\omega_{\max}}{\varepsilon_{\max}}; \\ t_4 = t_2 + t_3 - t_1; & t_5 = t_1 + \frac{\varphi_{\text{зад}}}{\omega_{\max}}; \\ t_6 = t_5 + t_2 - t_1; & t_7 = t_5 + t_3 - t_1; \\ t_8 = t_5 + t_4 - t_1, \end{cases} \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\max}$ - максимальное ускорение; $j_{\max}$ - максимальный рывок; $\omega_{\max}$ - максимальная скорость; $\varphi_{\text{зад}}$ - заданный угол поворота; t_1 - начало разгона, t_2 - переход на постоянное значение ускорения, t_3 - начало снижения абсолютного значения ускорения, t_4 - окончание разгона, t_5 - начало торможения, t_6 - переход на постоянное значение ускорения, t_7 - начало снижения абсолютного значения ускорения, t_8 - окончание торможения.

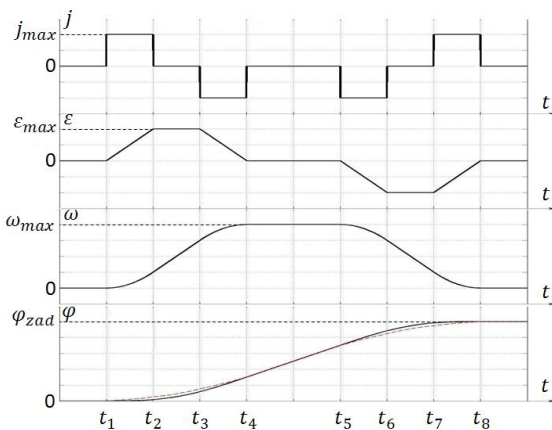


Рис. 3. Желаемые координаты второй массы

На основании вычисленных моментов времени формируется задающее воздействие по рывку [7]. На графиках (рис.3) представлены желаемые зависимости координат второй массы от времени.

При условии обеспечения следящим приводом заданной траектории первой массы механические процессы в исследуемой системе могут быть описаны следующим дифференциальным уравнением [5,6]

$$\frac{1}{J_2} \ddot{\varphi}_2 = C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (2)$$

где C_{12} - жесткость упругого звена и J_2 - момент инерции второй массы. В выражении (2) сухое и вязкое трение не учитываются.

Движение второй массы происходит под воздействием момента, возникающего при деформации упругой связи $\Delta\varphi$, определяемой выражением (3) [8]

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t). \quad (3)$$

С другой стороны, указанная деформация при известной жесткости упругой связи и моменте инерции второй массы, может быть определена в соответствии с (4) [10,11]

$$\Delta\varphi(t) = \frac{J_2}{C_{12}} \varepsilon_2(t). \quad (4)$$

Таким образом, траектория первой массы будет определяться выражением (5)

$$\varphi_1(t) = \varphi_2(t) + \frac{J_2}{C_{12}} \varepsilon_2(t). \quad (5)$$

В ходе анализа было установлено, что желаемая траектория первой массы не может быть реализована физически ввиду наличия разрывов первого рода в графике скорости. Обеспечение физической реализуемости указанной траектории произведено путем сглаживания сигнала задания посредством аperiодического звена первого порядка.

С целью подтверждения работоспособности предложенного алгоритма управления позиционным приводом разомкнутой двухмассовой системы проведен физический эксперимент со следующими параметрами: $C_{12} = 7.8 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$; $j_{\max} = 3.4 \text{ рад/с}^3$; $\varepsilon_{\max} = 2.0 \text{ рад/с}^2$; $\omega_{\max} = 2.0 \text{ рад/с}$; $t_1 = 1 \text{ с}$; $J_2 = 2.85 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $\varphi_{\text{зад}} = 3.14 \text{ рад}$.

При этом формирователь траектории первой массы реализован в среде

математического моделирования. Сигнал задания посредством платы РС11711-U подается на следящий привод, реализованный на базе микроконтроллера ADuC841 и приводного модуля LEGO NXT.

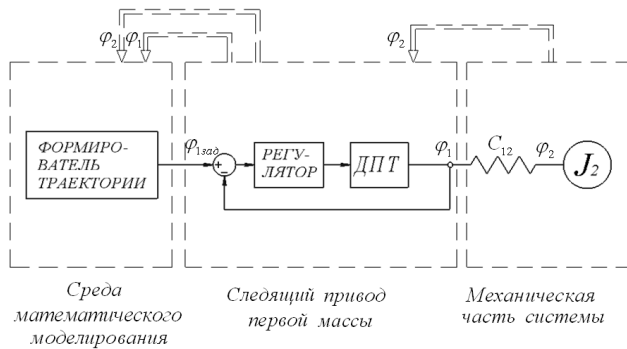


Рис. 4. Структура схема стенда для физического эксперимента

Положения первой и второй массы измерялись с помощью энкодеров. Сигналы энкодеров обрабатывались в микроконтроллере и в аналоговом виде подавались на входы платы РС11711-U, что позволило фиксировать графики изменения положений первой и второй массы средствами среды математического моделирования.

Графики изменения во времени положения первой массы представлены на рисунке 5, где 1 – результаты математического моделирования, 2 – физический эксперимент. Ошибка следящего привода не превышает 0.2 рад.

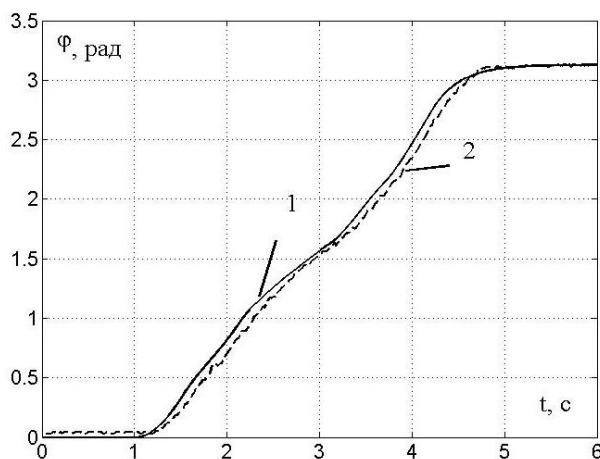


Рис. 5. Графики переходных процессов первой массы для математического (1) и физического (2) экспериментов

На рис.6: 1- положение первой массы, 2 - положение второй массы (математическое

моделирование), 3 - положение второй массы (физический эксперимент).

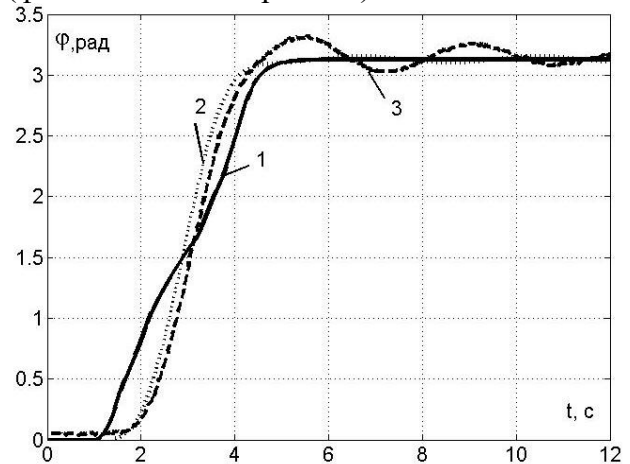


Рис. 6. Результаты эксперимента

Полученное для физического эксперимента перерегулирование составляет около 5%, что значительно лучше по сравнению с простыми задающими воздействиями, такими как линейно нарастающее задание и задание, изменяющееся скачком.

Из вышеперечисленного следует, что синтезированный регулятор обеспечивает управление позиционным электроприводом по разомкнутому алгоритму, и может быть использован при разработке систем управления объектами с наперед известными механическими параметрами.

Выводы. Разработанный лабораторный стенд позволяет исследовать алгоритмы управления двухмассовыми электроприводами при изменении момента инерции и статического момента сопротивления как для систем с обратной связью, так и без таковой.

Использование лабораторного стенда в совокупности с адекватной ему имитационной моделью, который является комплексным инструментом по разработке, отладке и оценке эффективности систем управления двухмассовыми электроприводами, позволяет снизить трудоемкость разработки систем управления для практических применений.

В позиционном приводе разомкнутой двухмассовой системы формирование траектории движения первой массы на основе априорных знаний об объекте управления позволяет получить заданную траекторию движения исполнительного механизма.

Список используемой литературы

1. Садовой, А.В. Релейные системы оптимального управления электроприводами [Текст] / А.В. Садовой, Б.В. Сухинин, Ю.В. Сохина, А.Л. Деретц. – Днепропетровск: ДГТУ, 2011. – 337 с.

2. Chornyi, O. Virtual complexes and simulators – the technology of enhancing the quality of students training in electromechanics and automation [Текст] / O. Chornyi, T. Koval, Yu. Lashko // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 1/2013 (21). – С. 90-95.

3. Осадчий, В.В. Лабораторный стенд для исследования алгоритмов микропроцессорных систем управления шаговыми двигателями [Текст] / В.В. Осадчий, Е.С. Назарова, С.Ю. Тоболкин // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Тематичний випуск науково-виробничого журналу. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 2/2014(26). – С. 102-108.

4. Бушер, В.В. Учебный программно-аппаратный макет для исследования двухмассовой электромеханической системы [Текст] / В.В. Бушер, Е.В. Найденко // *Электротехнические и компьютерные системы* – Киев: Техніка, 2015. – Вип. №20 (96). – С. 15-21.

5. Saarakkala, Seppo E. Identification of Two-Mass Mechanical Systems Using Torque Excitation: Design and Experimental Evaluation / Seppo E. Saarakkala, Marko Hinkkanen // *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.51, (2015), no.5. pp. 4180-4189. DOI: 10.1109/tia.2015.2416128.

6. Садовой, А.В. Новое в моделировании и исследовании электромеханических систем станов холодной прокатки [Текст] / А.В. Садовой, Е.С. Назарова, В.И. Бондаренко, А.В. Пирожок – Запорожье: Просвита, 2014. – 144 с.

7. Ключев, В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода [Текст] / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.

8. Борцов, Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями [Текст] / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.

9. Serkies, P.J. Predictive position control in two-mass drive with induction motor over a wide range of speed changes [Электронный

ресурс] / P.J. Serkies, G. Tarchała. Режим доступа: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-5f379ded-a336-4f16-893a-e6c551edf0fc/c/serkies_piotr_j_predictive_10_2012.pdf. (accessed April, 2016)

10. Герасимьяк, Р.П. Нагрузки в кинематических передачах двухмассовой электромеханической системы в режиме торможения [Текст] / Р.П. Герасимьяк, Е.В. Найденко // *Электротехнические и компьютерные системы*. – Киев: Техніка, 2015. – Вип. №17 (93). – С. 15-22.

11. Задорожний, Н.А. Синтез параметров астатической системы автоматического управления двухмассовыми электроприводами с заданной степенью устойчивости и минимальной колебательностью [Текст] / Н.А. Задорожний, И.Н. Задорожня // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків, 2015. – № 12 (1121). – С. 155-159.

Получено 30.04.2016

References

1. Sadovoy, A.V., Sukhinin, B.V., Sokhina, Yu.V., Derets, A.L. (2011) Releynie sistemi optimalnogo upravleniya elektroprivodami [Relay optimal control systems of electric drive], *DGTU. Dniprodzerzhinsk, Ukraine*. (In Russian)

2. Chornyi, O., Koval, T., Lashko, Yu. Virtual complexes and simulators – the technology of enhancing the quality of students training in electromechanics and automation, (2013), *Elektromekhanichni I energozberigauchi sistemi*, no. 1(21), pp. 90-95. (In English)

3. Osadchiy, V.V., Nazarova, Ye. S., Tobolkin, S.U. Laboratorniy stend dlya issledovsniya algoritmov mikroprotsessornikh system upravleniya shagovimi dvigatelyami [Laboratory bench for the research of algorithms microprocessor control systems of stepper motors], (2014), *Elektromekhanichni I energozberigauchi sistemi*, no. 2(26), pp. 102-108. (In Russian).

4. Busher, V.V., Naydenko, Ye.V. Uchebniy programno-aparatniy maket dlya issledovaniya dvukhmasovoy elektromekhanicheskoy sistemi [Educational software and hardware layout for the study two-mass electromechanical system], (2015),

Elektrotehnicheskiye I Komputernye Sistemi, no. 20 (96), pp. 15-21. (In Russian)

5.Saarakkala, Seppo E. & Hinkkanen, Marko. (2015), Identification of Two-Mass Mechanical Systems Using Torque Excitation: Design and Experimental Evaluation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.51, no.5. pp. 4180-4189. DOI: 10.1109/tia.2015.2416128. (In English)

6. Sadovoy, A.V., Nazarova, Ye.S., Bondarenko, V.I. and Pirozhok, A.V. (2014) Novoe v modelirovanii I issledovanii elektromekhanicheskikh system stanov kholodnoy prokatki [New in modeling and researching of cold rolling mills electromechanical systems], *Prosvita*. Zaporizhzhya, Ukraine. (In Russian)

7. Kluchev, V.I. (1971) Ogranicheniye dinamicheskikh nagruzok elektroprivoda [Limitation of dynamic electric loads], *Energiya*. Moscow, USSR. (In Russian)

8.Bortsov, Yu. A., Sokolovskiy, G.G. (1992) Avtomatizirovanniy elektroprivod s uprugimi svyaziami [Automated electric drive with elastic connections], *Energoatomizdat*. St. Petersburg, Russia. (In Russian)

9.Serkies, P.J., Tarchała, G. Predictive position control in two-mass drive with induction motor over a wide range of speed changes, available at: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-5f379ded-a336-4f16-893a-e6c551edf0fc/c/serkies_piotr_j_predictive_10_2012.pdf. (accessed April 15, 2016) (In English)

10.Gerasimiak, R.P., Naidenko, Ye.V. Nagruzki v kinematicheskikh peredachakh dvukhmassovoy elektromekhanicheskoy sistemi v rezhime tormozheniya [Pressures in the kinematic transmissions of two-mass electromechanical system in braking mode], (2015) *Elektrotehnicheskiye I Komputernye Sistemi*, no. 17 (93), pp. 15-22. (In Russian)

11.Zadorozhniy, N.A., Zadorozhniaya, I.N. Sintez parametrov astaticheskoy sistemi avtomaticheskogo upravleniya dvukhmassovimi elektroprivodami s zadannoy stepenyu ustoychivosti I minimalnoy kolebatelnostyu [Synthesis of parameters of astatic system of automatic control electric drive of two-mass with a given degree of stability and minimal vi-

brational], (2015), *Visnik NTU "KhPI"*, no. 12(1121), pp. 155-159. (In Russian).



Осадчий Владимир Владимирович;
канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Запорожского национального технического университета; 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64;
тел. (061) 7698313; e-mail: w.osadchiy@gmail.com



Назарова Елена Сергеевна;
канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Запорожского национального технического университета. 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64;
тел. (061) 7698313; e-mail: nazarova16@gmail.com



Брылистый Виктор Викторович;
студент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Запорожского национального технического университета; 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64;
тел. (063) 9328112; e-mail: 77vitya77@gmail.com



Савилов Роман Игоревич;
студент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Запорожского национального технического университета; 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64; тел. (093) 6278976; e-mail: firebarnsykes@gmail.com