

Модели микродвижений, вызывающих турбовинтовой эффект

А.В. Кучерявенко

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Проведен анализ микродвижений, вызывающих турбовинтовой эффект или микро-Доплер, выполнен анализ входных данных модели для построения банка функций, рассмотрен алгоритм уменьшения влияния турбовинтового эффекта, обоснована целесообразность формирования функции подобия для последующего снижения влияния микродвижений на портрет объекта.

Ключевые слова: спектр; радиолокационная станция, эхосигнал, турбовинтовой эффект, планерная составляющая, микро-Доплер, радар.

Использование беспилотных летательных аппаратов является перспективной задачей для современного мира. Беспилотные воздушные суда (дроны) обеспечат адресную индивидуальную доставку товаров и грузов. Дрон находится в воздухе практически постоянно, движется на низких траекториях в том числе в труднодоступной местности. Поэтому становится актуальной проблема обеспечения безопасности полетов дронов. Данная проблема усложняется, если речь идет об автоматической координации полета встречающихся дронов и навигации полетов роя беспилотных воздушных судов. Так же мешающее влияние на навигацию беспилотных воздушных судов оказывают ветровые энергетические установки, расположенные в удаленных районах, где и предполагается использовать беспилотные летательные аппараты.

Особенность радиолокационного сопровождения беспилотных летательных аппаратов заключается в присутствии в эхо-сигнале составляющих, возникающих за счет рассеяния от элементов конструкции, совершающих микро-движения: лопастей винтов объектов. Присутствие этих составляющих называется турбовинтовым эффектом или микро-Доплером, а составляющие называются турбинными составляющими. Наряду с полезной информацией, содержащейся в турбинных составляющих и помогающей определить тип аэродинамического объекта и режим работы его двигателя,

эти турбинные составляющие могут быть ошибочно восприняты как планерные составляющие этого или другого аэродинамического объекта и вносить ошибки в навигацию полетов. Присутствие турбинных составляющих затрудняет определение числа летающих объектов в рое для их ликвидации. На практике встречаются ситуации, когда амплитуда планерной составляющей оказывается соизмерима или ниже амплитуды турбинных составляющих [1]. На рисунке 1 показан спектр эхо-сигнала от летательного объекта с винтовым двигателем. Из рисунка видно, что наряду с планерной составляющей, доплеровская частота которой соответствует скорости 380 м/с, в спектре появились дополнительные составляющие, соответствующие скоростям 215 м/с, 275 м/с, 322 м/с и 438 м/с. В параметрах турбинных составляющих содержится информация, необходимая для решения задач распознавания типа объекта, режимов работы его двигателя, но именно эти спектральные составляющие могут быть ошибочно восприняты как планерные составляющие этого или другого объекта. На рисунке 1 единственным признаком, который отличает планерную составляющую от турбинных, является ее амплитуда, но на практике встречаются ситуации, когда амплитуда планерной составляющей оказывается соизмерима или ниже амплитуды спектральных составляющих турбовинтового эффекта. В этом случае селекция спектральных составляющих оказывается невозможной. На перемещение объекта указывает планерная составляющая. В спектре сигнала присутствуют составляющие достаточно большой амплитуды вызванные вращением винтов двигателя объекта – турбинные компоненты. Если объектов будет несколько, то турбинные компоненты накладываются друг на друга и могут имитировать планерную составляющую от несуществующего объекта или маскировать планерные составляющие соседних объектов. Это является

помехой для получения информации о движении летательных объектов и приводит к ошибкам пилотирования.

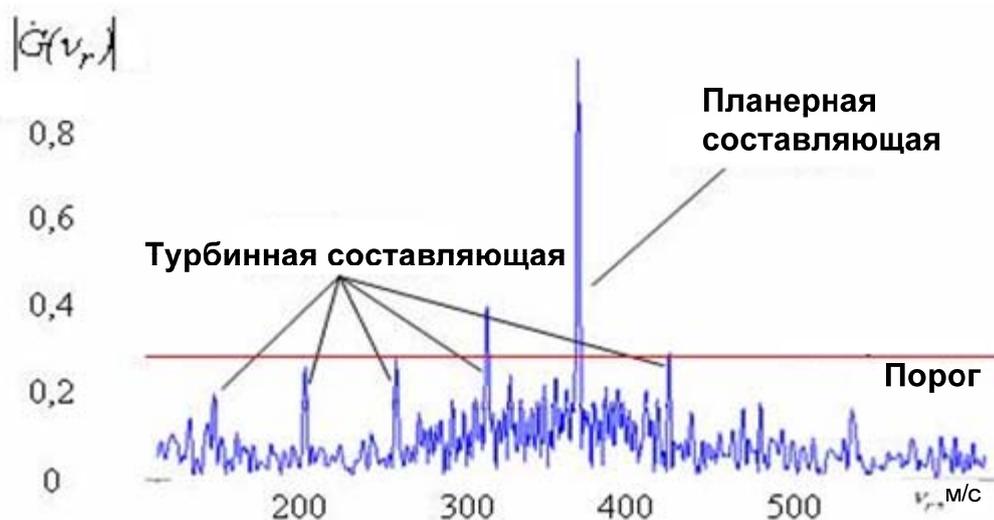


Рис. 1. – Турбинные и планерная составляющие в спектре эхо-сигнала.

Ситуация усугубляется, если радиолокационная станция сопровождает два и более объекта, находящихся на небольших удалениях друг от друга. Планерная составляющая второго объекта может быть соизмерима по интенсивности со спектральными составляющими турбовинтового эффекта первого объекта и схожа с ними по структуре. Это затрудняет анализ полета второго объекта, так как она может быть воспринята как составляющая турбовинтового эффекта первого объекта.

Поэтому актуальной является задача подавления турбинных составляющих спектра отраженного сигнала радиолокационной станции импульсного излучения. Представляется целесообразным разработка алгоритма подавления турбинного эффекта радиолокационного сигнала в импульсно-доплеровской радиолокационной станции.

Такой алгоритм может основываться на различии доплеровского приращении частоты для планерной составляющей спектра эхосигнала и частоты модуляции, обусловленной турбинным эффектом, а также анализа

изменения во времени амплитуды и полной мгновенной фазы для этих составляющих спектра.

Сравнение доплеровского приращения частоты для планерной составляющей спектра и частоты модуляции, обусловленной турбинным эффектом, показывает их существенное различие, поэтому изменение во времени амплитуды и полной мгновенной фазы для турбинного эффекта существенно медленнее, чем изменение этих же характеристик для планерной составляющей спектра огибающей эхосигнала. При этом слагаемое полной мгновенной фазы для планерной составляющей изменяется во времени по линейному закону, а слагаемое, соответствующее турбинному эффекту - по закону, близкому к гармоническому, что выражается в появлении боковых составляющих в спектре эхосигнала.

Уменьшение влияния турбинной составляющей

Алгоритм устранения компонент микродоплеровских сигналов [2], основанный на методе компенсации турбинных составляющих, состоит из последовательности шагов, состоящих из нескольких операций.

Первый шаг алгоритма состоит в подготовке входных данных. Первый шаг алгоритма основан на формировании пространства сигналов, базисными функциями которого являются функции, описывающие микродвижения элементов корпуса летательных аппаратов, то есть микродвижения, которые приводят к появлению турбинных составляющих. Банк функций микродвижения является базисом пространства [3] и связан с кинематикой микродвижений подвижных частей объекта.

Банк функций микродвижений $d_i(t)$ составляет базис пространства параметров микродвижений

$$D = \{d_i(t)\}. \quad (1)$$

Если объектом изучения является беспилотный летательный аппарат, то в качестве источника микродвижений следует рассматривать лопасти его несущих винтов. Функции базиса должны описывать кинематику движения лопастей винта объекта. На кинематику микродвижений влияет и число лопастей винта, так оно изменяет радиоизображение объекта [4]. На рис. 2 приведена пространственно-временная структура эхо-сигнала от винта с одной лопастью, полученная в экспериментальных условиях от реального объекта [4].

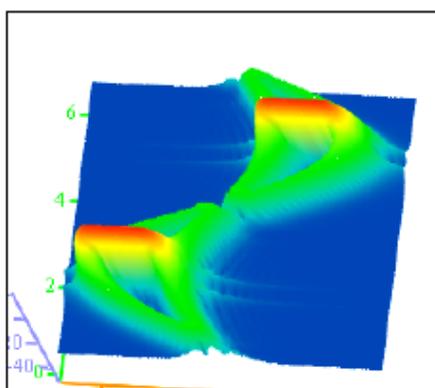


Рис. 2. – Структура эхо-сигнала от винта с одной лопастью.

На рис. 3 приведена пространственно-временная структура эхо-сигнала от винта с двумя лопастями [4].

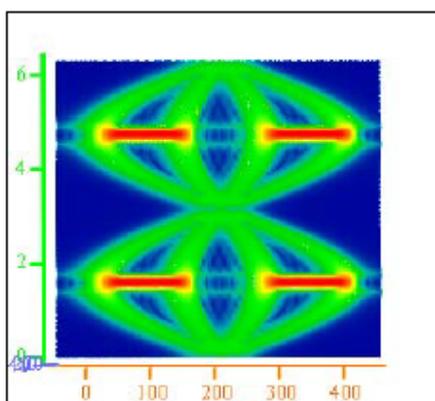


Рис. 3. – Структура эхо-сигнала от винта с двумя лопастями.

Как видно из рисунков 2 – 3, эхо-сигналы от объекта различаются в зависимости от числа лопастей винта. Чем больше лопастей, тем сложнее структура эхо-сигнала. Различные составляющие имеют приближающаяся

лопасть и уходящая лопасть винта. Вклад движения приближающейся лопасти в эхо-сигнал приводит к периодическим всплескам максимальной амплитуды сигнала, что можно наблюдать на фигуре 2 и фигуре 3. Всплески амплитуды, отмеченные красным цветом. Также нужно учитывать поверхность рассеивания лопасти винта. Лопасть не является точечным объектом, а имеет поверхность достаточно большой площади, близкую по форме к прямоугольной пластине. Эта поверхность рассеяния так же вносит значительный вклад в эхо-сигнал объекта.

Математический аппарат описания кинематических движений лопастей винта предложен в работе [5]. Данный математический аппарат используется для создания набора словаря базисных функций $\{d_i(t)\}$ для дальнейшего применения в алгоритме устранения компонент микродоплеровских сигналов.

На втором шаге выполнения алгоритма выполняется построение дальностно-доплеровского портрета объекта в разработанном пространстве базисных функций микродвижений. Дальностно-доплеровский портрет построен на оценке проекции эхо-сигнала объекта $y(t)$ на пространство D базисных функций микродвижений

$$I = (Y, D). \quad (2)$$

На третьем этапе алгоритма из портрета I вычитается компонента микродвижения

$$Y' = Y - I_{\max}. \quad (3)$$

Второй и третий шаг алгоритма выполняется до тех пор, пока энергия синтезируемого сигнала не станет равна энергии исходного эхо-сигнала с поправкой на погрешность ε

$$E_Y - E_{Y'} \leq \varepsilon. \quad (4)$$

Таким образом, в синтезируемом эхо-сигнале устраняются компоненты микродвижений объекта и остается только пилотная составляющая для дальнейшего анализа перемещений объекта.

Кинематика движения лопастей винта вертолета

Пространственно-временной портрет эхо-сигнала от лопастей винта летательного объекта [5] определяется выражением:

$$|s_{\Sigma}(t)| = \left| \sqrt{S_L} \exp\left\{-i \frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + z_0 \sin\beta]\right\} * \sum_{k=0}^{N-1} \operatorname{sinc}\left\{\frac{4\pi L}{\lambda} \cos\beta \cos\left(\Omega t + \varphi_0 + \frac{2\pi k}{N}\right)\right\} * \exp(-i\Phi_k(t)) \right|, \quad (5)$$

где N – число лопастей винта объекта, S_L – поверхность рассеяния лопасти винта, λ – длина волны работы радара, φ_0 – начальный угол поворота лопасти винта, Ω – скорость вращения лопасти винта, β – угол места направления на объект, z_0 – координата расположения винта на оси Z , относительно которой вращается лопасть, R_0 – расстояние от винта до радара или дальность объекта, $\Phi_k(t)$ – изменение фазы эхо сигнала:

$$\Phi_k(t) = \frac{4\pi L}{\lambda} \cos\beta \cos\left(\Omega t + \varphi_0 + \frac{2\pi k}{N}\right), \quad (6)$$
$$k = [0, N - 1].$$

Мгновенное изменение частоты Доплера, вызванное m -й лопастью винта [4], становится равной

$$f_{D,m}(t) = \frac{L}{\lambda} \Omega \cos\beta \left[-\sin\left(\varphi_0 + \frac{2\pi m}{N}\right) \sin(\Omega t) + \cos\left(\varphi_0 + \frac{2\pi m}{N}\right) \cos(\Omega t) \right] \quad (7)$$

Лопасть винта представляет собой пластину с большой площадью отражения эхо-сигнала. Поэтому необходимо учитывать влияние площади рассеивания лопасти в зависимости от ее геометрических размеров [5, 6]. Учет влияния площади рассеивания лопасти предусмотрен в выражении

$$S_d = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \left(\cos\theta \frac{\sin x_k \sin y_k}{x_k y_k} \right)^2, \quad (8)$$

где a – координата расположения лопасти на оси X , b – координата расположения лопасти на оси Y , θ – угол между осью Z и направлением на лопасть, φ – угол между осью X и проекцией направления на лопасть на оси Y , x_k, y_k определяются выражениями

$$x_k = a k \sin\theta \sin\varphi;$$

$$y_k = b k \sin\theta \cos\varphi. \quad (9)$$

На начальном этапе подготовки входных данных для алгоритма устранения компонент микроплеровских сигналов формируются массивы базисных функций, описывающие кинематику микродвижений элементов корпуса объекта во временной и в спектральной области. Для формирования массива во временной области используется выражение (7) с учетом выражения (8). Для получения набора базисных функций необходимо изменять параметры исходного выражения временной характеристики микродвижения в пределах ожидаемых значений, определяемых на основе предварительной информации о микродвижениях объекта. В рамках данной работы рассматривалось движение лопасти винта объекта, для построения базиса изменялась частота вращения лопасти.

Пример первой базисной функции для винта с одной лопастью приведен на рисунке 4.

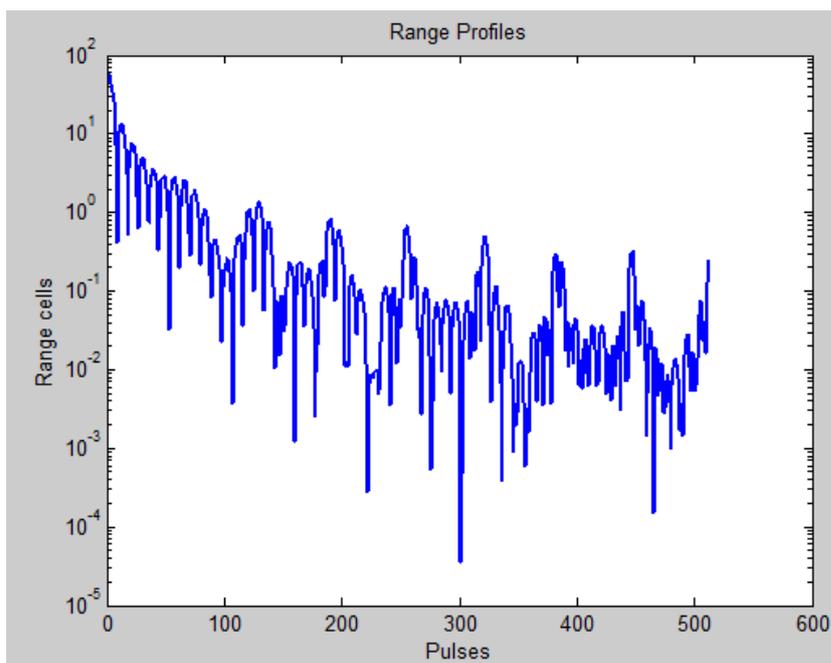


Рис. 4. – Первая базисная функция.

Пример второй базисной функции для винта с одной лопастью приведен на рисунке 5.

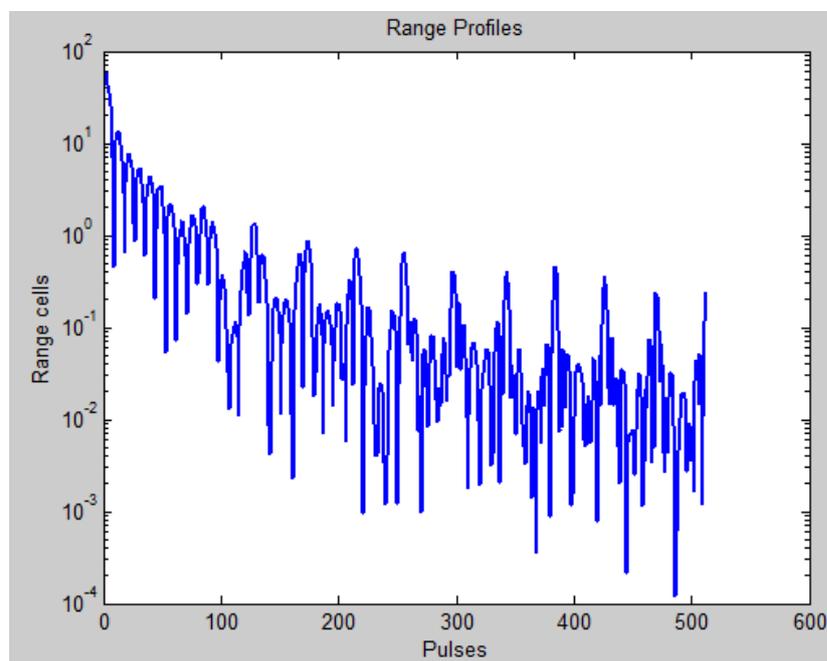


Рис. 5. – Вторая базисная функция.

При анализе полученных функций на рисунке 4 и рисунке 5 можно отметить периодические «всплески» - увеличения амплитуды сигнала. Это

явление объясняется приближением и удалением лопасти при вращении [5]. Интервал между «всплесками» связан со скоростью вращения лопасти винта.

Функции построенного базиса не ортогональны. Проанализировать независимость функций базиса можно на основании определителя Грама.

Определитель Грама двух базисных функций

$$Gr = \begin{vmatrix} f_1(t)f_1(t) & f_1(t)f_2(t) \\ f_2(t)f_1(t) & f_2(t)f_2(t) \end{vmatrix}, \quad (10)$$

Если определитель Грама не равен нулю и все элементы матрицы, кроме диагональных, равны нулю, то векторы линейно независимы. В противном случае векторы линейно зависимы и анализ не диагональных элементов позволяет оценить степень взаимной корреляции векторов.

На следующем этапе подготовки данных для алгоритма устранения компонент микроплеровских сигналов необходимо создать массив базисных функций, описывающих кинематику микродвижений, в спектральной области.

В результате работы выполнен этап реализации первого шага алгоритма, разработана и протестирована основная операция алгоритма построения дальностно-доплеровского портрета сложного объекта с микроплеровским возмущением, которая будет использована при дальнейшей разработке алгоритма устранения влияния микродвижений, искажающих портрет и приводящих к ошибкам в определении числа объектов в группе.

Заключение

Для решения задачи устранения турбинных составляющих в эхо-сигнале предлагается использовать алгоритм, использующий пространство базисных функций, описывающих микродвижения конструкций объекта. В работе получены несколько базисных функций данного пространства и отмечена необходимость подбора параметров данных функций для достижения

точного описания микродвижения и уменьшения взаимной когерентности базисных функций.

Литература

1. Слюсарь Н.М. Эффект вторичной модуляции радиолокационных сигналов: физические основы и практическое применение // Вестник Военной академии Республики Беларусь, 2003, №1, с. 61-77.

2. Федосов В.П., Евдокимова Е.О. Алгоритм согласованного преследования с компенсацией для анализа многокомпонентных доплеровских сигналов // Радиотехника и электроника, 2016, том 61, №10, с. 970-978.

3. Fedosov V.P., Evdokimova E.O. An algorithm of matched pursuit with compensation for the analysis of multicomponent Doppler signals. Journal of Communications Technology and Electronics, 2016. Vol. 61. N 10. pp. 1107-1114.

4. Слюсарь Н.М. Радиоизображения вращающихся лопастей и несущих винтов вертолетов. // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 года): материалы конференции в 2 ч. Ч. 1. Минск, 2014. С. 74-75

5. Chen V. The micro-Doppler effect in radar. Artech House Publishers, 2011. 283 p.

6. Mahafza B. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. London. U.K.: Chapman & Hall/CRC, 2000. 743 p.

7. Рыжов В.П., Федосов В.П. Многопользовательское пространственно-временное кодирование и декодирование в системе связи на основе антенных решеток // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн». Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2003. С. 15-19.

8. Кучерявенко А.В., Федосов В.П. Радар для ММО-систем // Труды XII Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых



ученых «Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАиУ-2014)». - Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2014. С. 192-193.

9. Федосов В.П., Муравицкий Н.С., Кучерявенко С.В. Техническая реализация и результаты испытаний пространственно-временного компенсатора отражений от подстилающей поверхности // Радиотехника, 2008. №11. С. 89-92.

10. Федосов В.П., Муравицкий Н.С., Кучерявенко С.В. Повышение эффективности радиосвязи в релейском канале на основе антенных решеток // Радиотехника, 2008. №11. С. 195-204.

11. Kucheryavenko A.V., Fedosov V.P. Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MatLab // XIII International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems". "DTS-2017". Rostov-na-Don: Serbian Journal of Electrical Engineering ISSN 1451-4869 (Scopus, DOAJ), 2017. pp. 59-64.

12. Кучерявенко А.В. Подавление турбинного эффекта радиолокационного сигнала в импульсно-доплеровской РЛС // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4440

13. Манжула В.Г., Крутччинский С.Г., Савенко А.В., Воронин В.В. Интерферометрический интерфейс системы определения относительных координат радиоизлучающих объектов // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1027

References

1. Slusar N.M. Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus, 2003, №1, pp. 61-77.

2. Evdokimova E.O., Fedosov V.P. Radiotekhnika i ehlektronika, 2016. Vol.61. № 10. pp. 970-978.

3. Evdokimova E.O., Fedosov V.P., In Proc. of the International Scientific Conference "Emission and scattering of EMV - IREMV-2-13". Taganrog: Publishing house SFU, 2013.

4. Slusar N.M., Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya, priurochennaya k 50-letiyu MRTI-BGUR (Minsk, 18-19 marta 2014 goda): materialy konferencii v 2 ch. CH. 1. Minsk. 2014. № 1, pp.74-75.

5. Chen V. The micro-Doppler effect in radar. Artech House Publishers. 2011. 283 p.

6. Mahafza B. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. London. U.K.: Chapman & Hall/CRC. 2000. 743 p.

7. Ryzhov V.P., Fedosov V.P. Trudy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Inluchenie i rassejanie jelektromagnitnyh voln". Taganrog: Izdatel'stvo Juzhnogo federal'nogo universiteta, 2003. pp. 15-19.

8. Kucherjavenko A.V., Fedosov V.P. Trudy XII Vserossijskoj nauchnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh "Informacionnye tehnologii, sistemnyj analiz i upravlenie (ITSAiU - 2017)". Taganrog: Izdatel'stvo Juzhnogo federal'nogo universiteta, 2014. Pp. 192-193.

9. Fedosov V.P, Muravickij N.S., Kucherjavenko S.V. Radiotehnika. 2008. №11. pp.89-92.

10. Fedosov V.P, Muravickij N.S., Kucherjavenko S.V. Radiotehnika. 2008. №11. pp.195-204.

11. Kucheryavenko A.V., Fedosov V.P. XIII International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems". "DTS-2017". Rostov-na-Don: Serbian Journal of Electrical Engineering ISSN 1451–4869 (Scopus, DOAJ), 2017. pp. 59-64.

12. Kucheryavenko A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4440



13. Manzhula V.G., Krutchinskij S.G., Savenko A.V., Voronin V.V.
Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012. №3. URL:
ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1027