

УДК 621.301

С.Н. ЛУТАЙ (канд. техн. наук, доц.), В.В. КОЛОМИЕЦ (канд. техн. наук, доц.),  
Б.Б. КОБЫЛЯНСКИЙ (канд. техн. наук)

Учебно-научный профессионально-педагогический институт  
Украинской инженерно-педагогической академии  
[Dep09@yandex.ua](mailto:Dep09@yandex.ua)

## СИСТЕМА ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩЕГО РУЛЕВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Представлены результаты исследования системы прямого цифрового управления следящего рулевого электропривода с алгоритмами перестройки коэффициента усиления основного контура в функции оценки частоты входного сигнала.

**Ключевые слова:** следящий рулевой электропривод, частотные характеристики, оценка частоты входного сигнала, контур коррекции.

**Постановка задачи и анализ последних достижений.** Следящие рулевые электроприводы автономных объектов нового поколения должны обладать полосой пропускания по угловому положению  $20 \div 25$  Гц с подъемом не более 1 дБ при обеспечении подавления амплитудной характеристики на частоте  $35 \div 40$  Гц на уровне 10 дБ и фазового запаздывания в полосе пропускания не более  $45^\circ$ . Общие требования минимизации массогабаритных показателей электропривода в целом при ограниченных энергетических возможностях создают определенные трудности выполнения данных требований. Влияние нелинейностей (сухое трение, люфт, ограничение по току и напряжению), делают проблематичным использование линейных регуляторов для достижения указанных характеристик электропривода.

Принимая во внимание поставленные задачи, предложена система управления электропривода с применением адаптивных структур, реализованных на базе микроконтроллера с возложением максимального количества функций на программный уровень.

**Изложение материала исследования и полученных результатов.** Функциональная схема следящего рулевого электропривода с цифровым микроконтроллерным регулятором представлена на рис.1. Сигналы задания, датчика положения и тахогенератора поступают на входы цифрового микроконтроллерного регулятора, где по разработанным алгоритмам в реальном времени вычисляется управляющее воздействие. После преобразования в ШИМ-сигнал управляющее воздействие через усилитель мощности подается на электродвигатель, который приводит во вращение редуктор, связанный с исполнительным органом. Наиболее характерным режимом работы следящего рулевого электропривода (рис.1) является отработка синусоидального сигнала с амплитудами в диапазоне от  $0,3$  до  $3^\circ$ .

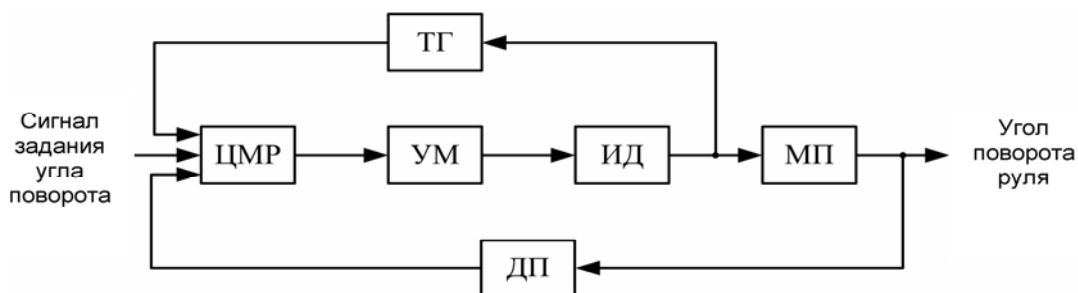


Рисунок 1 – Функциональная схема следящего рулевого электропривода:

ЦМР – цифровой микроконтроллерный регулятор; ТГ – тахогенератор; УМ – усилитель мощности; ИД – исполнительный двигатель; МП – механическая передача; ДП – датчик положения.

Математическое описание объекта управления следящего рулевого электропривода автономных объектов рассмотрено в [1].

Для обеспечения заданных динамических характеристик в нижней части частотного диапазона следящего рулевого электропривода были использованы принципы построения беспоисковых адаптивных систем управления с эталонной моделью [2] в сочетании с введением комбинированного управления по задающему воздействию (рис.2). На частотах до 20 Гц использование эталонной модели и комбинированного канала приводит к ожидаемым эффектам: система следует за эталонной моделью, причем как при сигнале задания в  $3^\circ$ , так и  $0,3^\circ$ . Однако на частотах свыше 20 Гц, где требуется резкое подавление амплитудной характеристики, система оказывается малоэффективной. При этом полоса пропускания по сигналу задания  $0,3^\circ$  из-за применения комбинированного управления может увеличиваться до 70-100 Гц, что приводит к резкому снижению помехоустойчивости электропривода.

© Лутай С.Н., Коломиец В.В., Кобылянский Б.Б., 2013

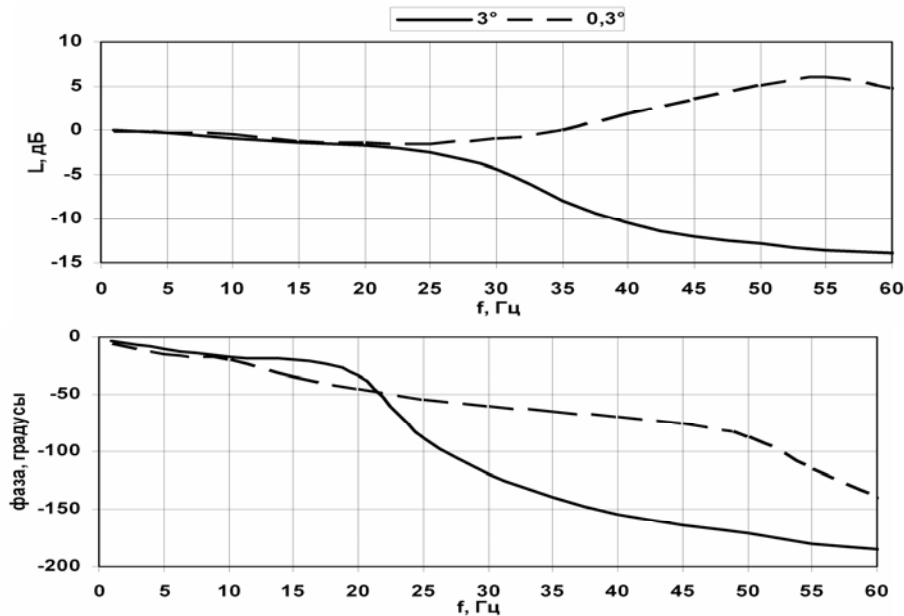


Рисунок 2 – ЛАЧХ и ФЧХ следящего рулевого электропривода с эталонной моделью и комбинированным управлением, полученные путем математического моделирования

Для обеспечения заданных характеристик электропривода во всем частотном диапазоне разработаны алгоритмы перестройки коэффициента усиления основного контура регулятора в зависимости от частоты входного сигнала, оценка которой осуществляется в рамках структуры, приведенной на рис. 3.

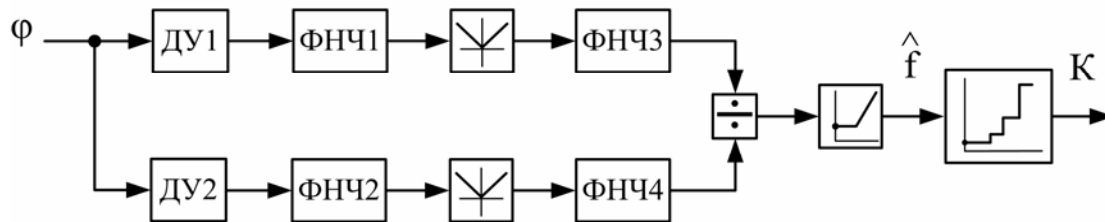


Рисунок 3 – Структура формирования сигнала коррекции:

$\varphi$  – сигнал задания угла поворота; ДУ1, ДУ2 – первое и второе дифференцирующие устройства; ФНЧ1, ФНЧ2, ФНЧ3, ФНЧ4 – соответственно первый, второй, третий, четвертый фильтры нижних частот;  $\hat{f}$  – сигнал оценки частоты; К – сигнал коррекции коэффициента усиления основного контура регулятора.

Сигнал задания подается на две параллельные ветви, которые отличаются тем, что фильтр нижних частот первой ветви выполнен с широкой полосой пропускания и незначительно подавляет амплитуду проходящего через него сигнала задания, а фильтр нижних частот второй ветви – с узкой полосой пропускания, в результате чего на его выходе формируется сигнал, амплитуда которого уменьшается с увеличением частоты входного воздействия.

Дифференцирующие устройства устраняют влияние постоянной составляющей сигнала задания. После операции деления вырабатывается сигнал, который может быть использован как оценка частоты входного гармонического воздействия. Дискретные передаточные функции звеньев, представленных на рис.3 имеет вид

$$W(Z)_{\text{ДУ1,ФНЧ1}} = \frac{\frac{1}{T_0} \cdot (z^{-1} - z^{-2})}{\frac{T_1^2}{T_0^2} + 2 \cdot \frac{T_1}{T_0} \cdot \left(\xi_1 - \frac{T_1}{T_0}\right) \cdot z^{-1} + \left(1 + \frac{T_1^2}{T_0^2} - 2 \cdot \xi_1 \cdot \frac{T_1}{T_0}\right) \cdot z^{-2}};$$

$$W(Z)_{\text{ДУ2,ФНЧ2}} = \frac{\frac{1}{T_0} \cdot (z^{-1} - z^{-2})}{\frac{T_2^2}{T_0^2} + 2 \cdot \frac{T_2}{T_0} \cdot \left(\xi_2 - \frac{T_2}{T_0}\right) \cdot z^{-1} + \left(1 + \frac{T_2^2}{T_0^2} - 2 \cdot \xi_2 \cdot \frac{T_2}{T_0}\right) \cdot z^{-2}};$$

$$W(Z)_{\text{ФНЧ3}} = \frac{K_1 \cdot z^{-1}}{\frac{T_1}{T_0} + \left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right) \cdot z^{-1}}; W(Z)_{\text{ФНЧ4}} = \frac{K_2 \cdot z^{-1}}{\frac{T_2}{T_0} + \left(1 - \frac{T_2}{T_0}\right) \cdot z^{-1}};$$

где  $T_0$  – интервал квантования по времени;  $T_1, T_2$  – постоянные времени первого и второго фильтра низких частот соответственно;  $\xi_1, \xi_2$  – затухание первого и второго фильтра низких частот;  $\tau_1, \tau_2$  – постоянные времени третьего и четвертого фильтров.

На рис.4 приведена зависимость оценки частоты от частоты сигнала задания, полученная моделированием структуры формирования сигнала коррекции, приведенной на рис.3.

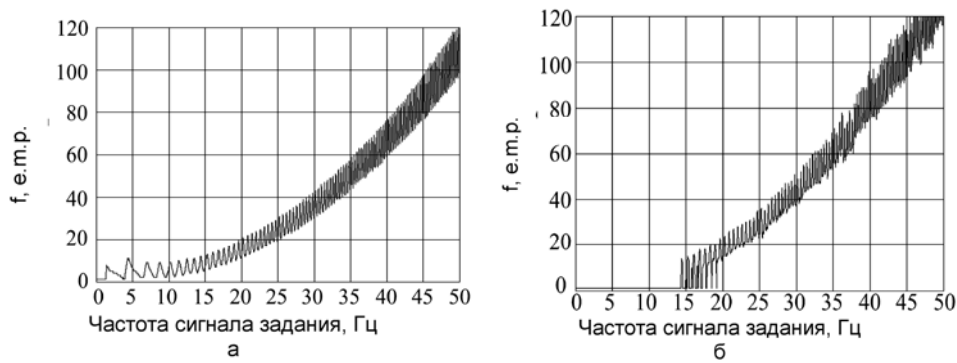


Рисунок 4 – Зависимость сигнала оценки частоты от частоты сигнала задания: а – для  $3^\circ$ ; б –  $0,3^\circ$

Сигнал оценки частоты представлен в единицах младшего разряда (е.м.р.) в масштабе, соответствующем переменной в цифровом микроконтроллерном регуляторе (ЦМР). Для исключения влияния разбросов оценки  $\hat{f}$  введена нелинейная характеристика  $K$  (рис.5). Сигнал коррекции  $K$  используется для уменьшения коэффициента усиления основного контура регулятора на частотах свыше 20 Гц.

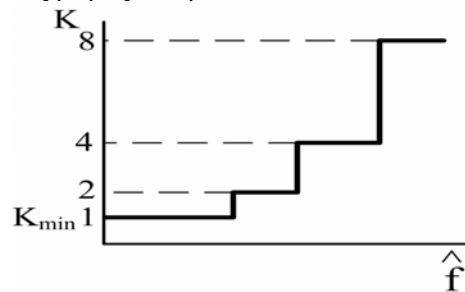


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента  $K$  от оценки  $\hat{f}$

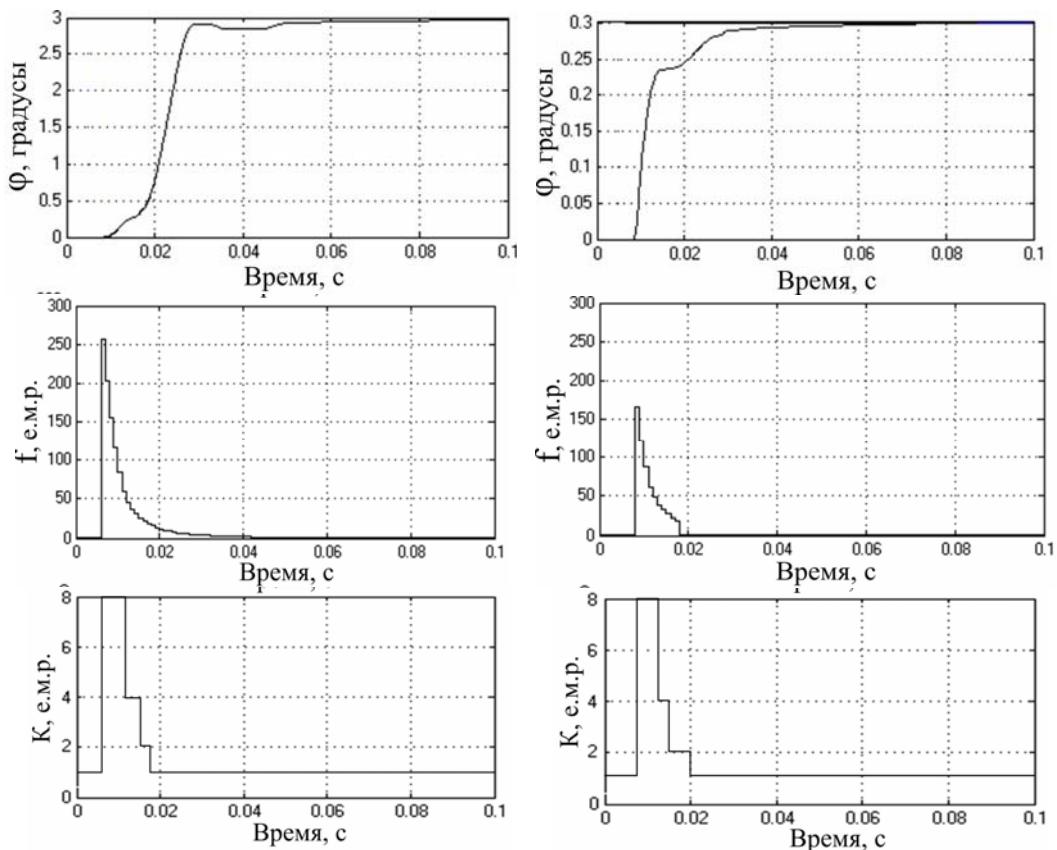


Рисунок 6 – Осциллограммы переходных процессов следящего привода с включенной коррекцией по оценке частоты входного воздействия при обработке скачка углового положения: а -  $3^\circ$ , б -  $0,3^\circ$

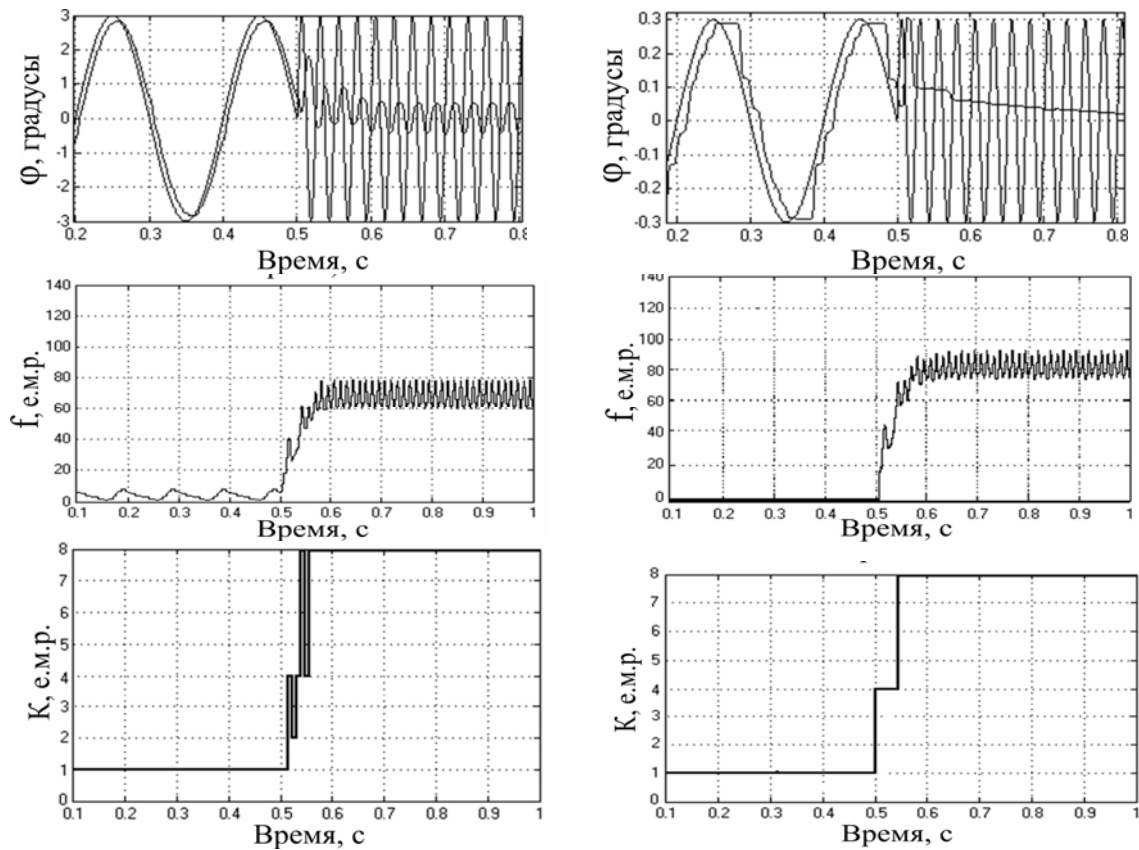


Рисунок 7- Осциллограммы сигнала оценки частоты сигнала задания  $f$  и сигнала коррекции  $K$  при переходе электропривода с обработки частоты входного воздействия 5 Гц к обработке 40 Гц

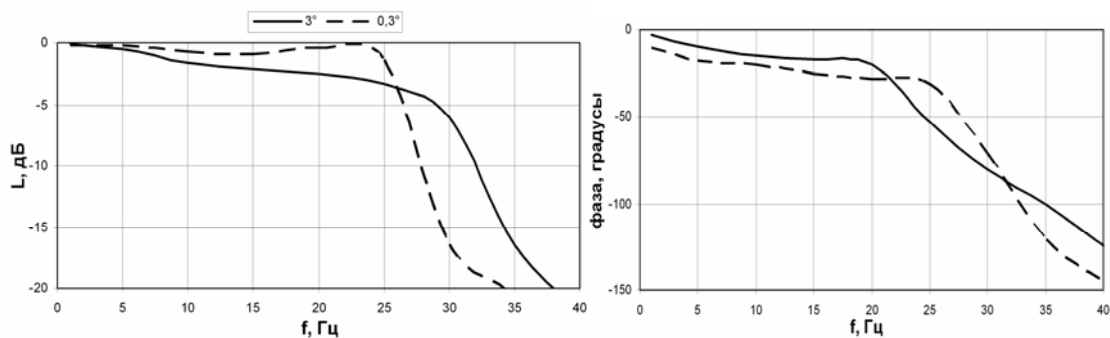


Рисунок 8 – ЛАЧХ и ФЧХ следящего рулевого электропривода с контуром коррекции

На рис.6 приведены осциллограммы переходных процессов следящего электропривода с включенной коррекцией по оценке частоты входного воздействия при отработке скачка углового положения, а на рис.7 – осциллограммы отработки электроприводом синусоидального воздействия при переходе от частоты 5 Гц к частоте 40 Гц. Введение контура адаптации по частоте сигнала задания позволяет подавить ЛАЧХ на частотах свыше 30 Гц.

На рис.8 представлены ЛАЧХ и ФЧХ следящего рулевого электропривода с контуром коррекции по частоте, полученные путем математического моделирования в инструментальной среде Simulink, которые отвечают заданным требованиям.

**Вывод.** На основе изложенного материала разработаны алгоритмы управления, ориентированные на микроконтроллерное воплощение [3], которые реализованы в следящем рулевом электроприводе автономного объекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов А.И. Математическое описание механической части следящего рулевого электропривода автономных объектов / А.И.Попов, А.С.Гончаров, В.Л. Бурковский // Электротехнические комплексы и системы управления : науч.-техн. журн. - Воронеж : Кварта.- 2008. - № 4. - С. 46-48.
2. Борцов Ю.А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов. - Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние.- 1984. - 216 с. : ил.

3. Пат. 2399017 Российской Федерации. Следящий рулевой электропривод / Булатов А.В., Гончаров А.С., Романов В.В., Попов А.И., Миронов С.М. ; опубли. 10.09.2010, Бюл. № 25. - 12 с. : ил.

## REFERENCES

1. Popov A.I., Goncharov A.S., Burkovskyy V.L. Mathematic description of mechanical part of tracing steering electric drive for autonomous objects. *Electrotechnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya*. Voronezh: Quart. 2008; № 4: 46-48.

2. Bortsov Yu.A., Polyahov N.D., Putov V.V. *Electromechanicheskie sistemy s adaptivnym i modalnym upravleniem* [Electromechanical systems with adaptive and modal control]. Leningrad: Energoatomizdat, 1984. 216 p.

3. Pat. 2399017 Russian Federation. Tracing steering electric drive / A.V. Bulatov, Honcharov A.S., Romanov V.V., Popov A.I., Mironov S.M., Publ. 10.09.2010, Bull. № 25, 2010. 12 p.

Надійшла до редакції 20.03.2013

Рецензент: О.І. Толочко

С. Н. ЛУТАЙ, В. В. КОЛОМИЕЦ, Б. Б. КОБЫЛЯНСКИЙ

Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Української інженерної педагогічної академії

**Система прямого цифрового керування слідкувального кермового електропривода автономних об'єктів.** У статті розглянуті результати дослідження системи прямого цифрового управління слідкувального рульового електроприводу з алгоритмами перебудови коефіцієнта посилення основного контуру у функції оцінки частоти вхідного сигналу.

**Ключові слова:** слідкувальний кермовий електропривод, частотні характеристики, оцінка частоти вхідного сигналу, контур корекції.

S.N. LUTAY, V.V. KOLOMIYETS, B.B. KOBYLIANSKY

Educational scientific professionally pedagogical institute of Ukrainian engineering pedagogical academy

**Direct Digital Control System Of Tracing Steering Electric Drive Of Self-Controlled Objects.** The article describes the results of a study of direct digital control servo steering actuator and algorithms adjustment coeffi the gain of the basic shape of the evaluation function in the frequency of the input signal. The material presented in this paper contains a systematic and well-novelty. Degree of elaboration of themes, caused a deep analysis of statistical data, which suggests the practical importance of the study, which does not cause the comments and style of the material. Taking into account the tasks, the authors propose the actuator control system with the use of adaptive structures, implemented on the basis of microcontroller with putting maximum of features for the programuro WenThe importance of this process, due to the severity of the mathematical apparatus, the correctness of the assumptions made in the description of the object of control, the results of mathematical modeling. The validity of research results is consistent and logical formulation of the objectives and research, which are based on a numerical simulation on a PC that representation as LACHH and phase after ducting control electric circuit with the correct frequency, obtained by mathematic modeling tool environment Simulink, which meet the requirements setnym. The paper used bespoiskovyh principles of management systems with reference model, combined with the introduction of combi Roval Control Asked impact condition From the above materials developedtany algorithms based management microcontroller incarnation, whichrye implemented in servo steering electric drive autonomous object.

**Key words:** the control steering electric drive, frequency characteristics, an estimation of frequency of an entrance signal, a contour of correction.