



ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ФАЗОВА АВТОМАТИЧНА ДОНАСТРОЙКА НА ЧЕСТОТАТА

Емил Йончев
e_iontchev@yahoo.com

*Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”, катедра “СОТС”
ул. “Гео Милев” 158, София 1574
БЪЛГАРИЯ*

***Ключови думи:** ФАДЧ, фазово затворени вериги, генератор управляван с напрежение, умножители, фазов детектор, интегратор*

***Резюме:** В доклада е разгледан принципа на функциониране на системата за фазова автоматична доннастройка на честотата (ФАДЧ) и са показани основните зависимости използвани при оразмеряване на конкретни принципни схеми. На базата на елементите от лабораторния кит ASLK PRO е синтезирана принципна схема на ФАДЧ. Работата на същата е симулирана с помощта на програмата TINA-TI и са изследвани основни параметри на системата. ФАДЧ е реализирана и върху лабораторния кит и са изследвани същите параметри. Направена е съпоставка между тях и е установено пълно съвпадение.*

ВЪВЕДЕНИЕ

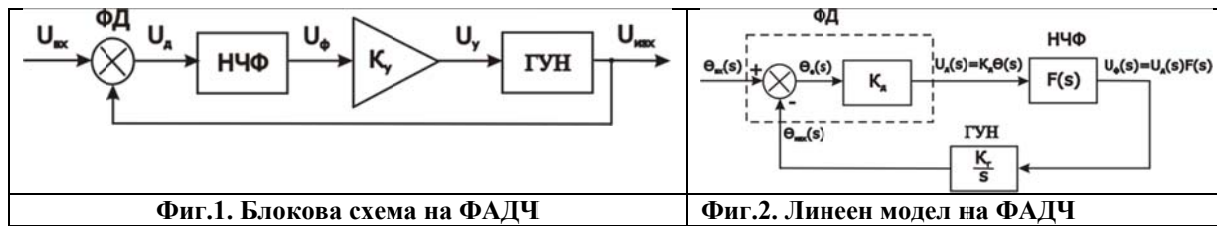
Фазовата автоматична доннастройка на честотата открива и отстранява малки фазови разлики между входния и опорния сигнал на системата. Промяната на фазата се осъществява чрез промяната на честотата на управляем генератор откъдето е и названието ФАДЧ. Тя се използва при конструирането на честотни синтезатори, честотни и амплитудни демодулатори, честотни манипулатори/деманипулатори, преобразуватели на напрежение в честота, следящи филтри, генератори, регулатори на обороти и други. Няма да е грешка ако се каже, че използваният принцип и неговите технически реализации се срещат във всяка радиоелектронна апаратура. Всичко това мотивира да се изложат основните зависимости посредством, които се определят параметрите на една такава система, да се предложи конкретно схемно решение на ФАДЧ и да бъде изследвана.

ОСНОВНИ ЗАВИСИМОСТИ

Основните блокове на ФАДЧ са показани на фигура 1. В зависимост от използваните технически средства за тяхното реализиране тя може да бъде: аналогова, импулсна, цифрова, комбинирана или програмна. Всички изрази в текста са обобщение на такива, изложени в литературни източници [1], [2], [3], [4], [5].

Фазовият детектор (ФД) сравнява фазовия ъгъл на входния сигнал $U_{вх}$ с фазовия ъгъл на изходното напрежение $U_{изх}$ от генератора управляван с напрежение (ГУН) и изработва напрежение U_d пропорционално на фазовата разлика между двата сигнала.

Това напрежение се филтрира от нискофrequentен филтър (НЧФ) и на изхода му се получава напрежение U_ϕ без високочестотни съставки.



Това напрежение се усилва от усилвателя с коефициент K_γ . Полученото напрежение U_γ се подава като управляващо на ГУН. То променя честотата на генератора съгласно израза:

$$(1) \quad w_{\text{изх}} = w_o + K_\gamma U_\gamma$$

където w_o е собствената честота на ГУН при липсата на входен сигнал, K_γ е коефициентът на преобразуване на ГУН с размерност Hz/V.

Входното напрежение има синусоидална форма и неговата моментна стойност се определя с израза:

$$(2) \quad u_{\text{вх}} = U_{\text{вх.м}} \sin(w_{\text{вх}} t + \varphi_{\text{вх}})$$

Изходният сигнал на ГУН може да има произволна форма в зависимост от конкретното схемно решение. В конкретната реализация изходният сигнал има правоъгълна форма. Той се представя с ред на Фурие:

$$(3) \quad u_{\text{изх}} = U_{\text{изх.м}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \sin((2n+1)w_{\text{изх}} t)$$

За изходното напрежение на фазовият детектор, когато е реализиран с умножител, се получава:

$$(4) \quad u_d = u_{\text{вх}} u_{\text{изх}} = \frac{2K_d}{\pi} U_{\text{вх.м}} U_{\text{изх.м}} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cos[(2n+1)w_{\text{изх}} t - w_{\text{вх}} t - \varphi_{\text{вх}}] - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cos[(2n+1)w_{\text{изх}} t + w_{\text{вх}} t + \varphi_{\text{вх}}] \right\}$$

където K_d е мащабен коефициент на фазовия детектор

След филтриране на високочестотните съставки от НЧФ и усилване с коефициент K_γ се получава управляващото напрежение за ГУН при $n=0$ (само първа хармонична):

$$(5) \quad u_\gamma = \frac{2K_d K_\gamma}{\pi} F(s) U_{\text{вх.м}} U_{\text{изх.м}} \cos[(w_{\text{изх}} - w_{\text{вх}})t - \varphi_{\text{изх}}]$$

Изходната честота на ГУН ще се променя с някаква стойност Δw спрямо честотата на свободните трептения, до момента, в който се синхронизират двата генератора:

$$(6) \quad w_{\text{вх}} = w_{\text{изх}} = w_o \mp \Delta w$$

Големината на управляващото напрежение в този случай се определя от израз (5), като коефициента на предаване на НЧФ $F(s)$ е единица за постоянни напрежения:

$$(7) \quad u_\gamma = \frac{2K_d K_\gamma}{\pi} |F(0)| U_{\text{вх.м}} U_{\text{изх.м}} \cos \varphi_{\text{изх}}$$

При $w_{\text{вх}} = w_{\text{изх}} = w_o$ управляващото напрежение е равно на нула, а дефазирането между входното и изходното напрежение е $\varphi_{\text{изх}} = 90^\circ$. Максималната стойност на управляващото напрежение се получава при $\varphi_{\text{изх}} = 0^\circ$ и $\varphi_{\text{изх}} = 180^\circ$:

$$(8) \quad U_\gamma = \mp \frac{2K_d K_\gamma}{\pi} |F(0)| U_{\text{вх.м}} U_{\text{изх.м}}$$

От формула (1) се определя честотният обхват на следене, в който системата за ФАДЧ може да остане синхронизирана:

$$(9) \quad \Delta w_{\text{сл}} = (w_{\text{изх}} - w_o)_m = \mp \frac{2K_d K_\gamma K_\gamma}{\pi} |F(0)| U_{\text{вх.м}} U_{\text{изх.м}}$$

Големината на обхвата на следене се определя от коефициентите на предаване на отделните блокове за постоянно напрежение и от амплитудата на входното и изходно напрежение.

Честотните характеристики на НЧФ определят чувствителността на ФАДЧ, като задават обхвата на захващане $\Delta w_{\text{захв.}}$. Това е област от честоти около собствената w_0 , в която ФАДЧ може да премине от несинхронизирано в синхронизирано състояние с входния сигнал. Този обхват е винаги по-малък от обхвата на следене.

$$(10) \quad \Delta w_{\text{захв.}} = \mp \frac{2K_d K_y K_r}{\pi} |F(j\Delta w_{\text{захв.}})| U_{\text{вх.м}} U_{\text{изх.м}}$$

където $|F(j\Delta w_{\text{захв.}})|$ е стойността на предавателната функция на НЧФ при кръгова честота w равна на обхвата на захващане $\Delta w_{\text{захв.}}$. За пасивен РС филтър времеконстантата му се определя от израза:

$$(11) \quad \tau \gg \frac{1}{2\Delta w_{\text{сл.}}}$$

Откъдето обхвата на захващане се определя с израза:

$$(12) \quad \Delta w_{\text{захв.}} \approx \mp \sqrt{\frac{\Delta w_{\text{сл.}}}{\tau}}$$

Като се променя времеконстантата на филтъра може да се регулира областта на захващане от 0 до $\Delta w_{\text{сл.}}$. Обикновено се използват НЧФ от първи ред.

За оценяване устойчивостта на системата се използва нейната фазова предавателна функция. Тя се определя като се използва математическия модел на системата показан на фигура 2.

$$(13) \quad H(s) = \frac{\theta_{\text{изх.}}(s)}{\theta_{\text{вх.}}(s)}$$

За определяне на фазовата предавателна функция е необходимо да се определят предавателните функции на отделните блокове. Фазовият детектор се представя като блок от нулев ред имащ коефициент на предаване K_d . Той се определя като се направи лапласова трансформация на израз (4). Предавателната функция на използвания филтър в конкретния случай е с един полюс и една нула и се описва с израза:

$$(14) \quad F(s) = \frac{1+s\tau_2}{1+s(\tau_1+\tau_2)}$$

Където $\tau_1 = R_1 C_1$ и $\tau_2 = R_2 C_1$ са времеконстанти. Означенията на елементите са взети от симулационния модел.

За да се определи предавателната функция на ГУН от израз (1) се определя изходната фаза на сигнала с израза:

$$(15) \quad \theta_{\text{изх.}}(t) = \int w_{\text{изх.}}(t) dt = K_r \int U_y dt$$

След лапласова трансформация на израз (15) се получава:

$$(16) \quad \theta_{\text{изх.}}(s) = \frac{K_r}{s} U_y(s)$$

Обобщената фазова предавателна функция е:

$$(17) \quad H(s) = \frac{\theta_{\text{изх.}}(s)}{\theta_{\text{вх.}}(s)} = \frac{K_r K_d F(s)}{s + K_r K_d F(s)}$$

Предавателната функция по отношение на грешката е:

$$(18) \quad H_e(s) = \frac{\theta_e(s)}{\theta_{\text{вх.}}(s)} = \frac{s}{s + K_r K_d F(s)}$$

Като се замести предавателната функция на филтъра в израз (17) се получава:

$$(19) \quad H(s) = \frac{\theta_{\text{изх.}}(s)}{\theta_{\text{вх.}}(s)} = \frac{K_r K_d \frac{1+s\tau_2}{\tau_1+\tau_2}}{s^2 + s \frac{1+K_r K_d \tau_2}{\tau_1+\tau_2} + \frac{K_r K_d}{\tau_1+\tau_2}}$$

Собствената честота и коефициента на затихване се определят с изразите:

$$(20) \quad w_c = \sqrt{\frac{K_r K_d}{\tau_1 + \tau_2}} \text{ и } \zeta = \frac{w_c}{2} \left(\tau_2 + \frac{1}{K_r K_d} \right)$$

След заместване на изразите (20) в израз (19) се получава окончателният резултат за фазовата предавателна функция на ФАДЧ:

$$(21) \quad H(s) = \frac{\theta_{\text{изх}}(s)}{\theta_{\text{вх}}(s)} = \frac{sw_c \left(2\zeta - \frac{w_c}{K_r K_d} \right) + w_c^2}{s^2 + 2s\zeta w_c + w_c^2}$$

Произведението $K_r K_d$ се нарича коефициент на усилване на затворената верига на ФАДЧ и обикновено има много по-голяма стойност от собствената честота. Когато това условие е изпълнено израз (21) може да се опрости до следният вид:

$$(22) \quad H(s) \approx \frac{2s\zeta w_c + w_c^2}{s^2 + 2s\zeta w_c + w_c^2}$$

Поведението на системата (22) (когато е в режим на синхронизация) е еквивалентно на всяка динамична система от втори ред. Тя може да следи фазата на входния сигнал за всички честоти, които се намират в лентата от 0 до собствената честота w_c . При различни стойности на коефициента на затихване се получават различни форми на амплитудно честотната характеристика на системата около областта на собствената честота. При стойности по-малки от единица се появяват отскоци, а при коефициенти над единица системата става по-бавно действаща. Установено е, че оптималната стойност на този параметър е $\zeta \approx 0.7$.

С израз (18) се изследва поведението на системата когато изначално тя не е в синхронен режим, като на нейният вход се подават различни форми на сигнала на грешката. Установява се, че ФАДЧ няма да влезе в режим на следене ако честотата на входния сигнал се променя със скорост по-голяма от w_c^2 . За целите на проектирането се избира

$$(23) \quad \frac{d\Delta w_{\text{вх}}}{t} = \frac{w_c^2}{2}$$

В зависимост от параметрите на системата се определят границите на различни области, в които тя може да е в режим на следене:

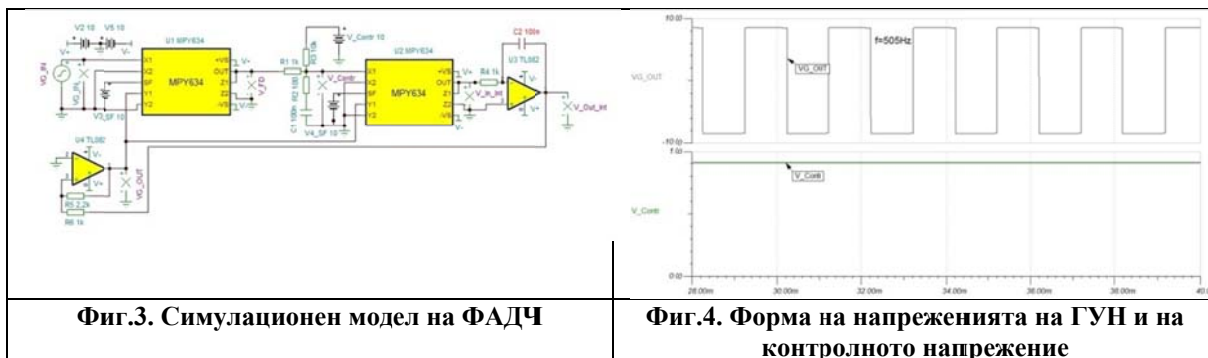
- Обхват на подържане на фазата - това е честотния диапазон, в който ФАДЧ може статично да следи фазата- $\Delta w_{\text{пф}} = K_r K_d$
- Динамична загуба на синхрон – това е динамичния диапазон на стабилна работа на ФАДЧ. Ако следенето се прекъсне в този интервал, то може да бъде възстановено отново, но много бавно - $\Delta w_{\text{дз}} = 1.8w_c(\zeta + 1)$.
- Динамично влизане в синхрон – Това е диапазона, в който ФАДЧ винаги влиза в режим на следене, като този процес може да бъде твърде бавен - $\Delta w_{\text{двс}} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{\zeta w_c K_r K_d}$
- Област на следене – това е честотния диапазон, в който честотата на ГУН веднага става равна на честотата на входния сигнал - $\Delta w_{\text{сл}} \approx 2\zeta w_c$.

СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ

За онагледяване на изложения принцип на работа на ФАДЧ и проверка на основните зависимости, е реализиран симулационен модел с програмата TINA-TI [6]. Това е софтуерен продукт съвместна разработка на фирмите Texas Instruments и DesignSoft. Изборът му е продиктуван от желанието за сравняване на получените резултати от симулацията с тези от реализирането на същата система върху лабораторни китове производство на Texas Instruments. Принципна схема, върху която се извършва симулацията е показана на фигура 3.

Фазовият детектор е реализиран с четириквadrантния умножител МРУ 634, означен на схемата с номер U1. На неговите входове се подава напрежението от входния генератор VG_IN и напрежението на ГУН. Този генератор е реализиран с умножителя U2, интегратора, реализиран с операцияния усилвател (ОУ)U3 и тригера на Шмит, реализиран с ОУ U4. Неговата честота се определя съгласно израза:

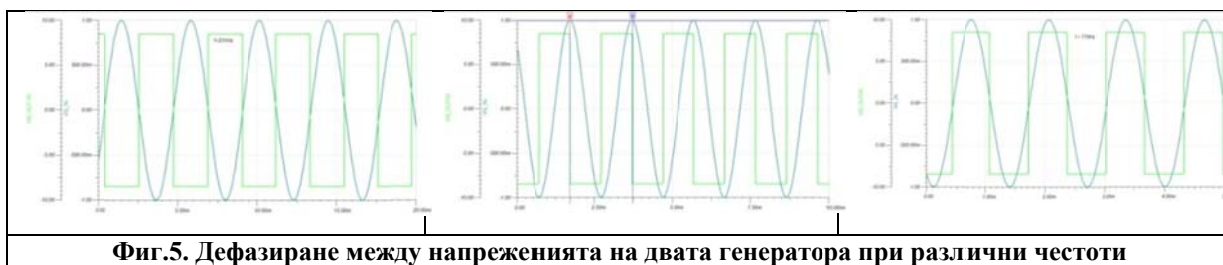
$$(24) \quad f_{\text{ГУН}} = \frac{V_{\text{Contr}} R_5}{4R_4 C_2 V R_6 V 4_{\text{SF}}}$$



Фиг.3. Симуляционен модел на ФАДЧ

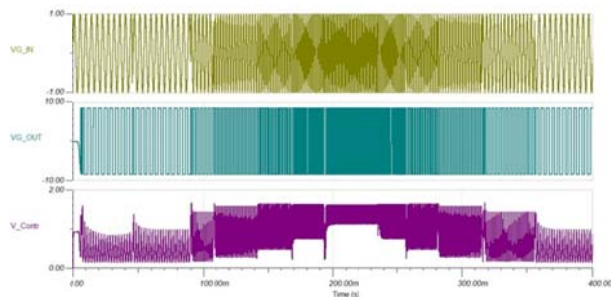
Фиг.4. Форма на напреженията на ГУН и на контролното напрежение

Всички означения са от симуляционния модел. От този израз може да се определи и коефициента K_r , като израз (24) се раздели на V_Contr . НЧФ е реализиран с елементите R_1, R_2 и C_1 . Със стойностите показани на схемата честотата на свободни трептения на ГУН е 505Hz. Формата и параметрите на изходното напрежение на генератора са показани на фигура 4. В случаят напрежението на входния генератор е поставено да бъде 0V.



Фиг.5. Дефазирание между напреженията на двата генератора при различни честоти

Дефазирането между сигналите на двата генератора, в граничните честоти на обхвата на следене 231Hz и 770Hz и собствената честота на ГУН са дадени на фигура 5.



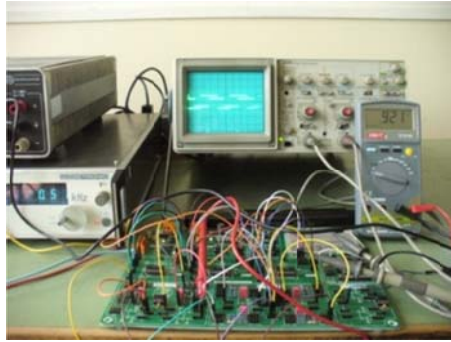
Фиг.6. Напрежение на изхода на НЧФ

Изменението на напрежението на изхода на НЧФ, при стъпалообразна промяна на честотата на входния генератор в обхвата на следене е показано на фигура 6.

ФИЗИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ФАДЧ

За проверка на достоверността на получените резултати схемата на ФАДЧ е реализирана върху лабораторен кит ASLK PRO [7] на фирмата Texas Instruments. Използваните интегрални схеми и захранващи напрежения са същите като при симуляционния модел. Получените резултати на тестваните параметри са еквивалентни с тези на симуляционния модел.

На фигура 7 са показани два от многото възможни параметри за изследване, а именно, дефазирането между двата сигнала при собствената честота и напрежението на изхода на НЧФ.



Фиг.7 Дефазирание между напреженията на двата генератора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада е представен принципа на функциониране на ФАДЧ и формулите за определяне на основните параметри на системата. На базата на възможностите предоставени от лабораторният кит ASLK PRO е синтезирана принципна схема на ФАДЧ, която е симулирана с програмата TINA-TI. Същата схема е реализирана и физически върху лабораторния кит. На получените параметри, при двете реализации, е направена съпоставка. Има пълно съвпадение между получените резултати. Схемата може да се доразвие, а именно, вместо пасивен филтър, да се използва активен, да се използва делител в обратната връзка, за да се получи по-висока честота на изходния генератор от тази на входния, да се реализира синтезатор и др. Всички тези възможности са обект на разработка в лабораторните упражнения по дисциплината "Аналогова и импулсна техника".

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Ангелов А. и др., Микропроцесори в радиотехническите системи, София, Техника, 1989г.
- [2] Connelly J. A., Analog integrated circuits- Devices, Circuits, Systems and Application, John Wiley and Sons, 1975.
- [3] Goldman St. J., Phase-Locked Loop Engineering Handbook for Integrated Circuits, Artech House, Inc, 2007, ISBN-13: 978-1-59693-154-1
- [4] Karris St. T., Signals and Systems with MATLAB® Applications, Orchard Publications, 2003, ISBN 0-9709511-8-3
- [5] Best R. E., Phase-Locked Loops – Design, Simulation and Applications, McGraw-Hill
- [6] <http://www.ti.com/lit/ug/sbou052a/sbou052a.pdf>
- [7] <http://www.ti.com/tool/ASLKPRO>

INVESTIGATION OF THE PHASE-LOCKED LOOP

Emil Iontchev
e_iontchev@yahoo.com

*Todor Kableshkov University of Transport, 158, Geo Milev Str., 1574 Sofia,
BULGARIA*

Key words: *phase-locked loop, voltage-controlled oscillator, multipliers, phase detector, integrator*

Abstract: *In the report are presented the basic principles of working of the phase-locked loop system. They are shown the basic equations which are used to design the concrete schemes. The design of the system is based on the elements of the laboratory kit ASLK PRO. The work of it is simulated in the powerful circuit design and simulation tool TINA-TI and also the basic system parameters were investigated. The same investigation was done on the PLL which was implemented on the laboratory kit ASLK PRO. It is made a comparison between the simulated and the real parameters and it is concluded that they are equivalent.*