

А.А.УМАРОВА¹, Г.А.ШУКЕНОВА², А.А.УМАРОВ³

¹Кардиолог-дәрігер, Алматы 7-ші қалалық клиникалық ауруханасы
(Қазақстан, Алматы қ.), e-mail: amankelgikyzy15@gmail.com

²аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: gshukenova@list.ru

³PhD, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: uaa_77@mail.ru

НАЙКВИСТ КРИТЕРИИН ҚОЛДАНЫП БАСҚАРУ НЫСАНЫНЫҢ ОРНЫҚТЫЛЫҒЫН ТАЛДАУ

Аңдатпа. Орнықтылық - сыртқы әсерлердің әсерінен жүйенің қазіргі күйін ұстап тұру қабілетін білдіретін басқару жүйелерінің негізгі қасиеттерінің бірі. Жүйенің орнықтылығын зерттеу медицинада, психологияда, инженерияда және т.б. шешуші рөл атқарады. Мысалы, психологияда адамның стресстік жағдайын дұрыс реттеу оған өмірлік қиындықтарға, жағдайлардың қолайсыз қысымына төтеп беруге, денсаулығы мен тиімділігін сақтауға мүмкіндік береді.

Жүйелердің орнықтылығын зерттеудің артықшылығы мынада: жобаланған жүйенің орнықтылығын дәрежесін анықтай отырып, оның құрылымы мен параметрлерін оңтайландыру, жүйені жұмыс істейтін және пайдалы ету үшін шараларды әзірлеуге және құралдарды анықтауға болады. Графоаналитикалық әдістерді аналитикалық әдістерге қарағанда қолданудың артықшылығы - олардың анықтығы мен қарапайым түсіндірілуінде.

Бұл жұмыста басқару объектілерінің модельдері қарастырылып, Nyquist критерийі бойынша жүйенің орнықтылығын талдау есебі берілген. Бұл критерий тұйық емес жүйенің жиілік сипаттамаларына негізделген тұйық автоматты басқару жүйелерінің тұрақтылығын бағалауға мүмкіндік береді. Сондай-ақ, Nyquist годографын құру алгоритмі қарастырылған, осы алгоритм жүйенің тұрақтылығын анықтауды жеңілдетеді. Сондай-ақ, жұмыста орнықты және орнықты емес объектінің салыстырмалы талдауы, сондай-ақ оларды басқару ерекшеліктері келтірілген. Осы жұмыста ұсынылған модельдерді медицина, психология, технология, экономика және т.б. салалардағы қолданбалы басқару мәселелерін шешуге қолдануға болады.

Кілт сөздер: басқару нысаны, орнықтылық, Найквист критерийі, годограф, графоаналитикалық әдіс.

A.A. Umarova¹, G.A. Shukenova², A.A. Umarov³

¹Cardiologist-doctor, Almaty 7th city clinical hospital
(Kazakstan, Almaty), e-mail: amankelgikyzy15@gmail.com

²Senior teacher, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University
(Kazakstan, Turkestan), e-mail: gshukenova@list.ru

³PhD, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University
(Kazakstan, Turkestan), e-mail: uaa_77@mail.ru

Stability analysis of the control object using the Nyquist criterion

Abstract. Stability is one of the main qualities of control systems, expressing the ability of the system to maintain its current state under the influence of external influences. The study of system stability plays a key role in medicine, psychology, engineering, etc. For example, in psychology, the correct regulation of a person's stress state allows her to withstand life difficulties, adverse pressure of circumstances, maintain health and efficiency.

The benefit of analysing the stability of systems is that, having determined the degree of stability of the designed system, it is possible to develop measures and determine means to optimize its structure and parameters, make the system workable and useful. The advantage of using graphoanalytic methods over analytical ones lies in their clarity and simple interpretation.

In this paper, models of control objects are considered, and the task of analyzing the stability of the system according to the Nyquist criterion is presented. This criterion allows us to assess the stability of a closed automatic control systems based on the frequency characteristics of an open system. An algorithm for constructing a Nyquist hodograph is also provided, which makes it easy to determine the stability of the system according to the schedule. The paper also provides a comparative analysis of a stable and unstable object, as well as the features of their management. The models presented in this paper can be applied to solving applied management problems in the field of medicine, psychology, technology, economics, etc.

Keywords: control object, stability, Nyquist criterion, hodograph, graphoanalytic method.

А.А. Умарова¹, Г.А. Шукенова², А.А. Умаров³

¹Врач-кардиолог, 7-ая городская клиническая больница Алматы
(Казахстан, г. Алматы), e-mail: amankelgikyzy15@gmail.com

²старший преподаватель, Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясави (Казахстан, г. Туркестан), e-mail: gshukenova@list.ru

³PhD, Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясави
(Казахстан, г. Туркестан), e-mail: uaa_77@mail.ru

Анализ устойчивости объекта управления с использованием критерия Найквиста

Аннотация. Устойчивость – одно из основных качеств систем управления, выражающая способность системы сохранять текущее состояние при влиянии внешних воздействий. Исследование устойчивости системы играет ключевую роль в медицине, психологии, технике, и т.д. Например в психологии, правильная регуляция стрессового состояния личности дает ей противостоять жизненным трудностям, неблагоприятному давлению обстоятельств, сохранять здоровье и работоспособность.

Польза от исследования устойчивости систем состоит в том, что, определив степень устойчивости проектируемой системы, можно выработать меры и определить средства для оптимизации ее структуры и параметров, сделать систему работоспособной и полезной. Преимущество применения графоаналитических методов перед аналитическими заключается в их наглядности и простой интерпретации.

В настоящей работе рассматриваются модели объектов управления, приводится задача анализа устойчивости системы по критерию Найквиста. Этот критерий позволяет оценить устойчивость замкнутой систем автоматического регулирования по частотным характеристикам разомкнутой системы. Также приводится алгоритм построения годографа Найквиста, по которому легко определить устойчивость системы по графику. В работе также дается сравнительный анализ устойчивого и неустойчивого объекта, а также особенности их

управления. Приведенные в настоящей работе модели можно применить при решении прикладных задач управления в области медицины, психологии, техники, экономики, и т.д.

Ключевые слова: объект управления, устойчивость, критерий Найквиста, годограф, графоаналитический метод.

Кіріспе

Орнықтылық ұғымы – басқару теориясының негізгі ұғымдарының бірі, себебі ол - басқару жүйелерінің негізгі қасиеті болып саналады да, жүйенің сыртқы күш әсерінен ішкі күйін сақтау қабілетін білдіреді. Орнықтылық заңдарын, критерийлерін зерттеген ғалымдар: А.Ляпунов, А. Гурвиц, Г. Найквист, т.б. [1-4].

Кез келген жүйені (басқару нысанды (БН)) сипаттау оның математикалық моделі арқылы жасалады. Аналитикалық моделдер формула, заң, ереже, теорема, т.б. түрінде беріледі. Графикалық моделдер БН-ды графикалық схема, диаграмма, карта, т.б. түрінде беріледі [2, 3].

Орнықтылық критерийлері алгебралық (Гурвиц, Раус, Вышнеградский) және жиілікті (Михайлов, Найквист) болып екіге бөлінеді [4, 7, 8].

Найквист критеріі (1932) аналитикалық Гурвиц критеріінен артықшылығы – орнықтылықты зерттейтін графоаналитикалық әдіс, яғни, графиктік және аналитикалық модельдердің бірігуі. Оның ерекшелігі – тұйық емес жүйенің амплитудалы-фазалы сипаттама (АФС / годограф / Логарифмдік АФС) түріне қарап, тұйық жүйенің орнықтылығын / орнықсыздығын анықтап, орнықтылық шегін бағалайды [3].

Математикалық тұрғыдан, орнықтылық механикалық тепе-теңдікте тұрған жүйеге өте кіші ұйытқу берілгендегі жүйе реакциясын көрсетеді. Орнықтылық деңгейін оның шегі арқылы бағалайды [5, 6].

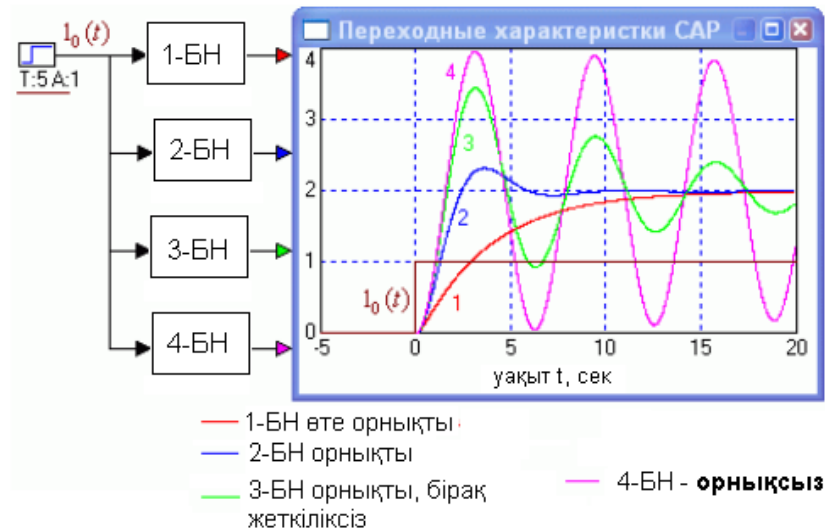
Жүйенің орнықтылығын зерттеу медицинада, психологияда, техникада және т.б. маңызды рөл атқарады. Мысалы, психологияда тұлғаның стресс (күйзеліс) жағдайын дұрыс реттеу оған өмірлік қиындықтарға, түрлі жағдайларда орын алатын қысымына қарсы тұруға, денсаулық пен өнімділікті сақтауға мүмкіндік береді. Психологиялық орнықтылықты (төзімділікті) зерттеуге үлес қосқандар Г.Селье, З. Фрейд, Х. Вольф, Д. Механик, т.б. [8-10].

Материалдар мен әдістер

Жүйе / басқару нысанының (БН) орнықтылығын талдауда VisSIM имитациялық моделдеу ортасы пайдаланылды. VisSIM кешені қарапайым интерфейсіне, функционалды қызметтері мол болғандықтан, басқару жүйелерін моделдеуде, синтездеуде жиі қолданылады.

БН-ң орнықтылығын график түрінде оның ө т п е л і функциясы (өтпелі сипаттама ӨС), амплитудалы-фазалы сипаттамасы (АФС / годограф) арқылы көрсетуге болады.

Ляпунов критеріі бойынша жүйе орнықты д.а., егер оған ұйытқу әсері беріліп, тоқтағанда, жүйе өзінің бастапқы күйіне келетін болса [1, 2]. Жүйенің бастапқы күйге өту процесін ӨС арқылы байқауға болады: *жүйе орнықты*, егер оның ӨС уақыт барысында бірқалыпты (монотонды) немесе тербеліп жатып белгілі тұрақты мәнге (*тапсырмаға*) ұмтылатын болса.



1-сурет. Орнықтылық деңгейі (орнықтылық шегі)

БН-ң өтпелі сипаттамасы жүйенің шығыс шамасының бір тұрақты күйден (0-күйі) екінші тұрақты күйге (1-күйі) өту тәртібін көрсетеді. Яғни, БН-ға $i_0(t)$ түріндегі басқару сигналы (тапсырма) беріледі, жүйе осы сигналға жауап реакциясын тудырады.

Өте баяу өтпелі процесс (1-ші БН – қызыл сызық) БН-ң үлкен инерциялы қасиеті бар екенін көрсетеді. Егер БН параметрлерін өзгертсек, жүйе орнықтылық шегіне жағындаса, ОС тербелмелі сипатқа ие болады (3 және 4-ші БН, жасыл мен күлгін сызық), яғни, жүйе орнықтылық шегіне жақын болған сайын, оның тербеліс амплитудасы баяу төмендейді. Ең тиімді басқару жүйесінің ОС - аperiodты (2-ші БН): тербеліс қатты емес және оның амплитудасы тезірек сөнеді (1-сурет).

Найквист критеріі

Найквист годографын сызу үшін жүйенің АФС тұрғызамыз. Ол жүйенің шығыс спектрі мен кіріс спектрін байланыстырып, амплитудалы – фазалы жиіліктік сипаттаманы анықтайды:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega) \exp^{j\varphi(\omega)} \quad (1)$$

$$Y(j\omega) = W(j\omega) X(j\omega) \quad (2)$$

Мұндағы ω – комплекстік айнымалы, $W(j\omega)$ – комплекстік $P(\omega)$, $Q(\omega)$ – комплекстік беріліс коэффициенті (КБК), ω -ның сәйкесінше нақты (real) және жорамал (image) бөлігі, $X(j\omega)$ – кіріс сигнал спектрі, $Y(j\omega)$ – шығыс сигнал спектрі, A – сигнал амплитудасы.

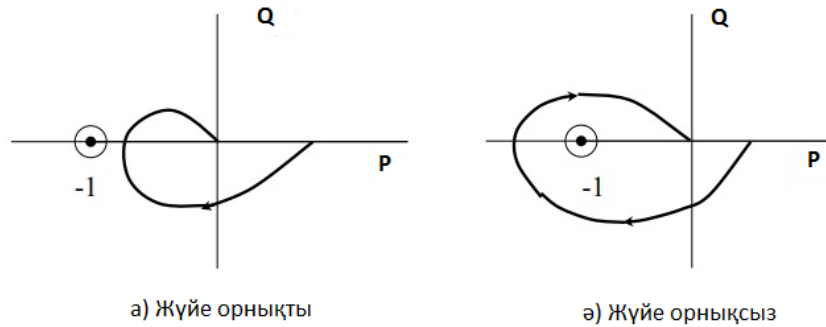
Жүйенің АФС келесі екі сипаттамаға, яғни, амплитуда мен фазаға бөлшектенеді:

$$Y = |W(j\omega)| X \quad (3)$$

$$\varphi = \varphi + \varphi_w(\omega) \quad (4)$$

мұндағы X , Y – сигналдың сәйкесінше кіріс / шығыс амплитудасы, φ – сигнал фазасы. Найквист критеріін пайдалану шарты – тұйық емес жүйе орнықты болу қажет.

Тұйық жүйе орнықты болып табылады, егер оның тұйық емес контургодографының комплексі беріліс коэффициенті (КБК) комплекс жазықтығының нақты осінде басталып, жиілік $(0; \infty)$ аралығында өзгергенде $(-1, 0j)$ нүктесінен айналып өтпесе (2-сурет).

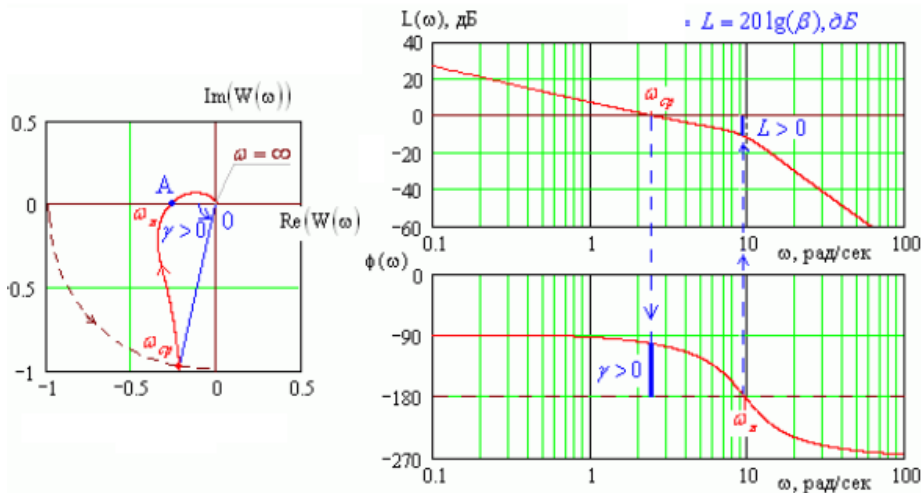


2-сурет. Жүйенің КБК годографы

Найквист критеріі жиі қолданылады, себебі ол жүйенің орнықтылық шектерін анықтай алады да келесі сұрақтарға жауап береді (3-сурет):

- Амплитуда бойынша орнықтылық шегі β : жүйенің күшейту коэффициентін қанша Дб-ге арттырсақ орнықтылық шегіне жетеміз.

- Фаза бойынша орнықтылық шегі γ : жүйенің фазасын қанша рад-ға (градуска) арттырсақ орнықтылық шегіне жетеміз.



Амплитуда б/ша орнықтылық шегі $\beta = \frac{1}{A0}$,

Фаза б/ша орнықтылық шегі γ , градус

3-сурет. Жүйенің орнықтылық шектерін анықтау

Найквист годографын құру алгоритмі

- 1) Жүйенің беріліс функциясы беріледі;
- 2) Беріліс функцияны комплекс түрге келтіру;
- 3) Жилікті $(0; \infty)$ аралығында өзгертіп КБК есептеу;
- 4) КБК бойынша график тұрғызу (абсцисса осімен КБК-ң нақты бөлігі, ал ордината осімен жорамал бөлігі көрсетіледі).

Есептің қойылуы

1-ші м ы с а л

Берілгені: БН –ның беріліс функциясы:

$$K = 1$$

$W1(s) = K * 1/(s^2 + s + 1)$ –тұйық емес жүйенің беріліс функциясы (1-ші БН)

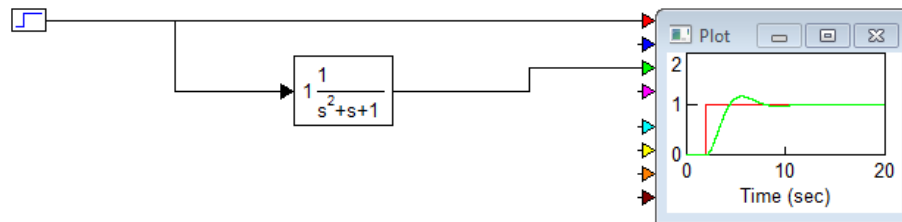
$W2(s) = K * 1/(s^2 + s - 1)$ – тұйық емес жүйенің беріліс функциясы (2-ші БН)

Табу керек: БН-ң орнықтылығын зерттеу.

Есептеу алгоритмі

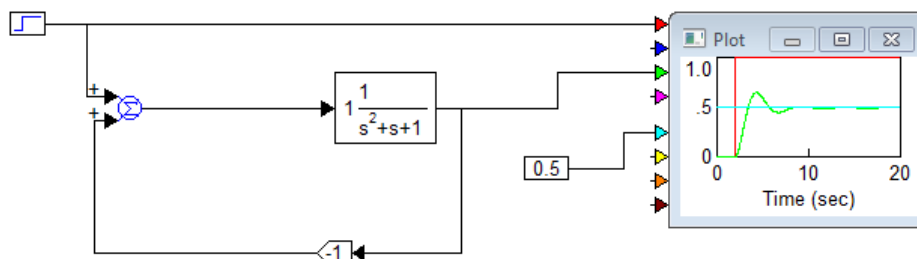
1. Берілген тұйық емес БН-дың өтпелі сипаттамасын алу (график);
2. Тұйық БН құру (кері теріс байланыс қосу) және өтпелі сипаттамасын алу (график);
3. Алынған сипаттама бойынша БН-ң орнықтылығын анықтау;
4. Тұйық БН Найквист критеріін қолданып орнықтылыққа зерттеу (график).

Төмендегі графиктерде осы алгоритм іске асырылған.



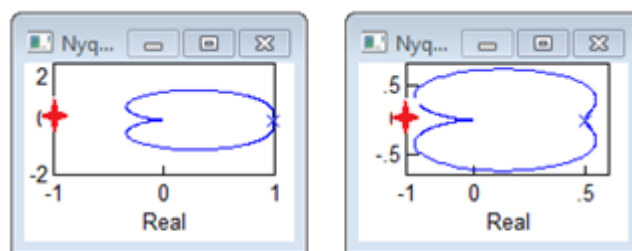
4-сурет. Тұйық емес 1-ші БН-ң өтпелі сипаттамасын алу

Тұйық емес 1-ші БН – Ляпунов критеріі бойынша орнықты (4-сурет).



5-сурет. Тұйық 1-ші БН-ң (кері байланысы бар) өтпелі сипаттамасын алу

Тұйық 1-ші БН – Ляпунов критеріі бойынша орнықты болып саналады (5-сурет).



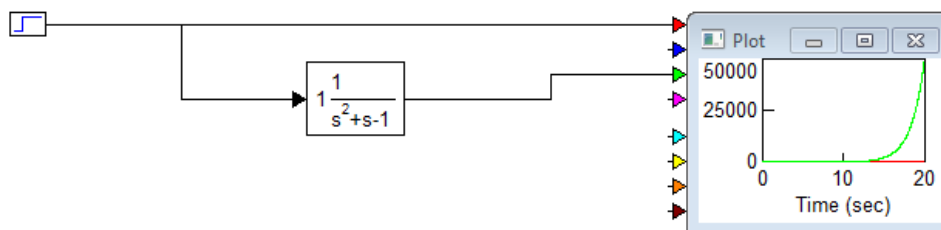
а) Тұйық емес БН годографы

ә) Тұйық БН годографы

6-сурет. Тұйық және тұйық емес 1-ші БН-ң годографы

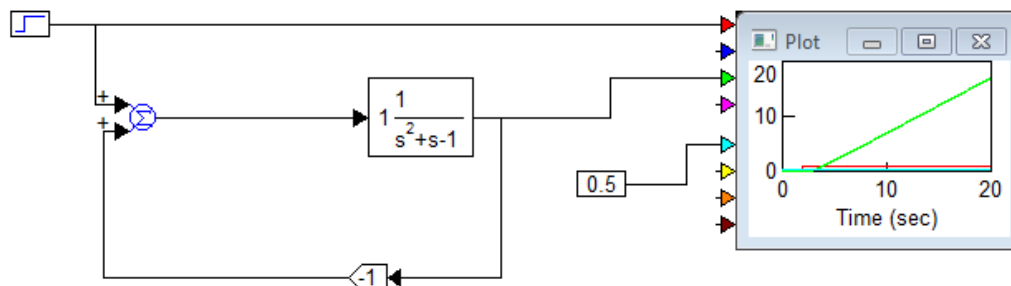
Тұйық және тұйық емес 1-ші БН-ң годографын сызамыз да Найквист критеріінің орындалуын тексереміз. 6-суретте (-1, 0j) нүктесі қызыл жұлдызбен бейнеленген. Тұйық және тұйық емес БН (-1, 0j) нүктесін айналып өтпейтіні айқын көрініп тұр, сондықтан жүйе – орнықты.

Дәл осылай 2-ші БН зерттейміз.



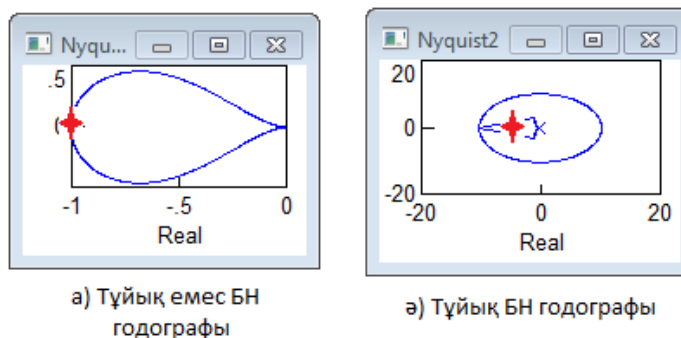
7-сурет. Тұйық емес 2-ші БН-ң өтпелі сипаттамасын алу

Тұйық емес 2-ші БН – орнықты емес екені көрініп тұр (7-сурет).



8-сурет. Тұйық 2-ші БН-ң (кері байланысы бар) өтпелі сипаттамасын алу

Тұйық 2-ші БН – орнықты емес екенін білеміз (8-сурет).



а) Тұйық емес БН
годографы

ә) Тұйық БН годографы

9-сурет. Тұйық және тұйық емес 2-ші БН-ң годографы

Тұйық және тұйық емес 2-ші БН-ң годографын сызамыз да Найквист критеріінің орындалуын тексереміз. 9-суретте $(-1, 0j)$ нүктесі қызыл жұлдызбен бейнеленген. а) тұйық БН – орнықтылық шегінде орналасқан (орнықты), ал ә) тұйық емес БН $(-1, 0j)$ нүктесін айналып өтетіні айқын көрініп тұр, яғни, орнықсыз.

Кез келген жағдайда осылай бола бермейді. Жүйенің пропорционал коэффициентін (П-буын) өзгертсек, тұйық емес орнықты жүйе тұйықталған кезде – орнықсыз болып кетуі мүмкін. Осы жағдайды қарастырамыз.

2 – ш і м ы с а л

Берілгені:

БН –ның беріліс функциясы:

$K1 = 2.5e+06$

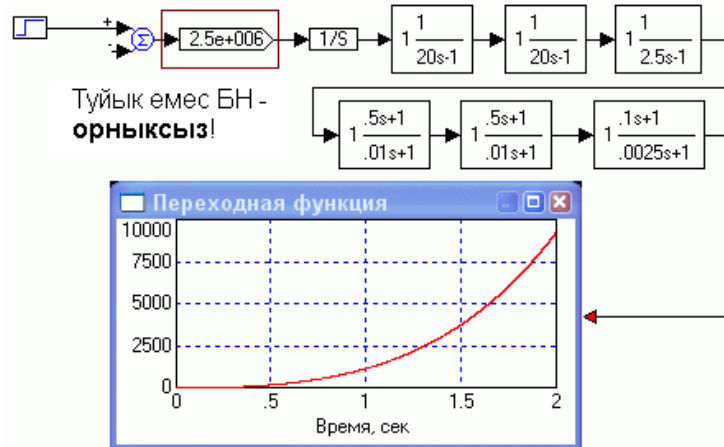
$K2 = 1e+05$

$W3(s) = K1 * 1/S * 1/(20s-1) * 1/(20s-1) * 1/(2.5s-1) * (.5s+1)/(.01s+1) * (.5s+1)/(.01s+1) * (.1s+1)/(.0025s+1)$ – 3-ші БН беріліс функциясы

Табу керек:

БН-ды орнықтылыққа зерттеу.

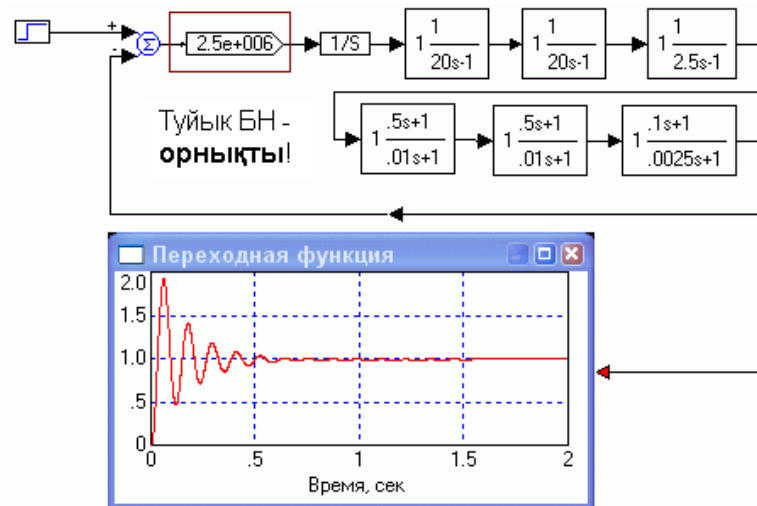
БН-ды талдаймыз: П-буын коэффициенті - $2.5e+06$, И-буын коэффициенті - $[20; 20; 2.5; 0.01; 0.01; 0.0025]$; И-буын бос мүшелері – $[-1; -1; -1; +1; +1; +1]$; Д-буын коэффициенті – $[0.5; 0.5; 0.1]$. Яғни, И-буын бос мүшелер саны – 3.



10-сурет. Тұйық емес БН-ң өтпелі сипаттамасы

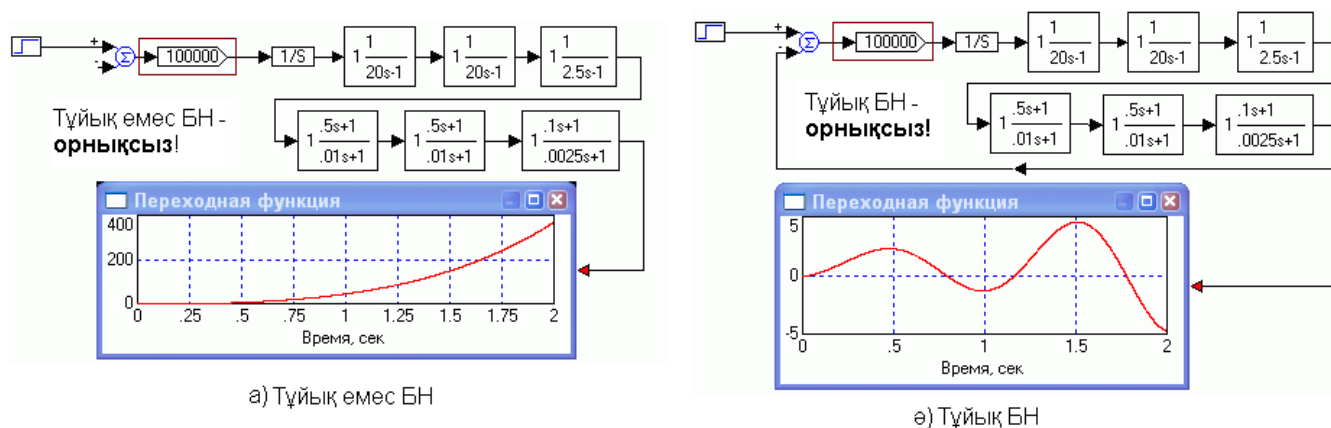
Тұйық емес БН – орнықсыз. Себебі, Стодола ережесіне сәйкес, интегратордан кейінгі алғашқы үш буынның теріс интегралды коэффициенттері бар. Яғни, жүйе құрамындағы осы үш буын тұтас жүйені орнықсыз етіп тұр.

Найквист критеріі бойынша – орнықсыз тұйық емес буынды / БН-ды тұйық етіп өзгертсек, яғни, оған теріс кері байланыс енгізсек, онда ол буын / БН – орнықты жүйеге айналады. $K1 = 2.5e+06$ болған жағдайда БН орнықты болады екен (11-сурет).



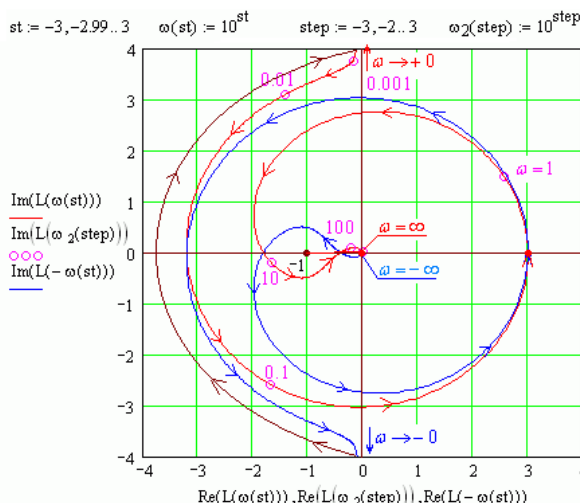
11-сурет. Тұйық басқару нысаны – орнықты

Бірақ, бұл жағдай әрдайым орындала бермейді. Мысалы, егер күшейту коэффициентін $K2 = 1e+05$ деп өзгертсек, онда БН – орнықсыз болады (12-сурет).



12-сурет. Тұйық емес және тұйық БН

Сөйтіп, орнықсыз жүйені орнықты ету (стабилизация) үшін, біріншіден, жүйеге теріс кері байланыс енгіземіз, екіншіден, жүйеге реттеуіш құралдарын енгіземіз. Одан соң Найквист критеріі бойынша тексереміз.



13-сурет. Тұйық және тұйық емес 2-ші БН-ң годографы

БН талдау нәтижесінде оның И-буын бос мүшелер саны 3-ке тең болғандықтан, БН-ң КБК годографы $(-1, 0j)$ нүктесін оң бағытта 3 рет айналады (13-сурет). Нәтижеде тұйық емес БН (қызыл сызық) орнықсыз болғанымен, оған теріс КБ енгізгенде пайда болған тұйық БН (көк сызық) – орнықты болып табылады.

3 – ш і м ы с а л

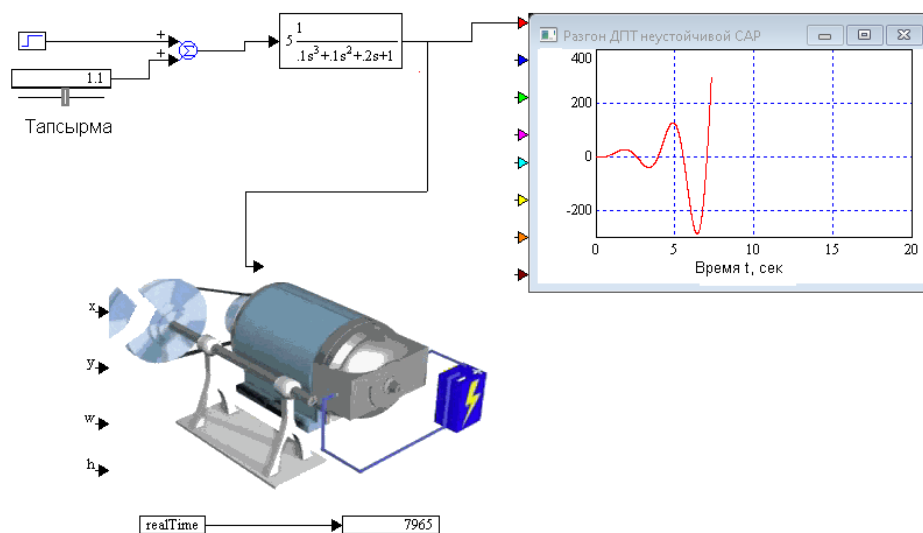
Берілгені:

БН –ның беріліс функциясы:

$K = 5$

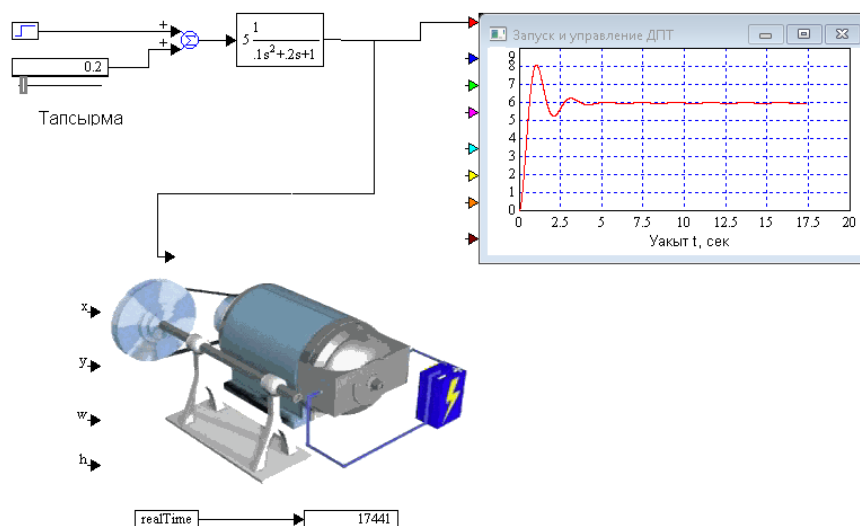
$W4(s) = 5 * 1 / (0.1s^3 + 0.1s^2 + 0.2s + 1)$ – 4-ші БН беріліс функциясы

$W5(s) = 5 * 1 / (0.1 s^2 + 0.2s + 1)$ - 5-ші БН беріліс функциясы



14-сурет. 4-ші БН өтпелі сипаттамасы

4-ші БН (тұйық емес жүйе) - орнықсыз. БН ретінде мотор берілген, ол орнықсыз болғандықтан, жүктемелік дискі сынып кетті (14-сурет).



15-сурет. 5-ші БН өтпелі сипаттамасы

5-ші БН (тұйық емес жүйе) - орнықты. БН ретінде басқа мотор берілген, ол орнықты болғандықтан, жүктемелік дискі бірқалыпты айналып тұр (15-сурет).

Нәтижелер және талдаулар

Бұл жұмыста техникалық басқару нысандардың модельдері сипатталып, бірнеше мысал келтірілген. Атап айтқанда, тұйық және тұйық емес басқару нысанының беріліс функциясы беріліп, оның өтпелі сипаттамасы алынады. Одан соң Найквист критерийін қолдана отырып жүйенің орнықтылығын талдау есебі келтіріледі.

Жүйенің орнықтылығын анықтаудың практикалық маңызы үлкен. Мысалы, психологияда тұлғаның стресс (күйзеліс) жағдайын дұрыс реттеу оған өмірлік қиындықтарға, түрлі жағдайларда орын алатын қысымына қарсы тұруға, денсаулық пен өнімділікті сақтауға мүмкіндік береді.

Техникада жобаланып жатқан құрылғыны алдынала орнықтылыққа тексеріп, оның

эксплуатациялық қасиеттерін анықтау маңызды.

3-ші мысалда екі түрлі БН моделі келтірілген. Нысанның $W4(s)$ беріліс функциясы орнықсыз болғандықтан, өтпелі кезең барысында БН апаттық шағдайға ұшырайды.

Ал, нысанның $W5(s)$ беріліс функциясы орнықты болғандықтан, өтпелі кезең барысында БН бірқалыпты қызмет етіп, нормал эксплуатациялық жағдайды сақтап тұрады.

Мысалда берілген БН орнықтылыққа зерттеліп, келесі тұжырымдалар алынды:

- Егер тұйық емес жүйе – орнықты болса, онда осы жүйеге теріс кері байланыс енгізгенде пайда болған тұйық жүйе де – орнықты болады.

- Егер тұйық емес жүйе – орнықсыз болса, онда осы жүйеге теріс кері байланыс енгізгенде пайда болған тұйық жүйе де – орнықсыз болады.

Қорытынды

Мақалада келтірілген бес есепте басқару жүйесінің орнықтылығы зерттелген. Таңдау критеріі ретінде графоаналитикалық Найквист критеріі алынған, себебі:

- графоаналитикалық әдістердің көрнекілігі жоғары және қарапайым интерпретация береді,

- алгербалық теңдеуді шешпей-ақ орнықтылықты анықтау мүмкін.

Найквист критеріі бойынша орнықтылықты анықтауда жүйенің амплитудалық-фазалық сипаттамалары (годограф) алынып, қорытынды жасалады.

Жұмыста пайдаланылған моделдерді медицинада, психологияда, экономикада, техникада, т.с.с көптеген салаларда кездесетін басқару есептерін шешуде пайдалануға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Емельянов С.В., Коровин С.К., Ильин А.В., Фомичев В.В., Фурсов А.С. Математические методы теории управления. Проблемы устойчивости, управляемости и наблюдаемости - Физматлит, 2013. — 200 с.

2. Барбашин Е.А. Введение в теорию устойчивости. М.: Ленанд, 2022.

3. Федосов Б.Т. Задания и методические указания к выполнению курсовой работы на тему: Анализ и оптимизация системы автоматического регулирования. Рудный, 2004.

4. M. Amin, C. Zhang, A. Rygg, E. Unamuno, M. Molinas, and M. Belkhatat. Nyquist Stability Criterion and its Application to Power Electronic Systems // Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, John Wiley & Sons (pp.1-22). 2019.

5. Александров А., Тихонов А.. Анализ устойчивости механических систем с существенно нелинейными позиционными силами при наличии распределенного запаздывания // Автоматика и телемеханика, № 1, С.3-22. 2023.

6. Tikhonov A.A. Natural magneto-velocity coordinate system for satellite attitude stabilization: The concept and kinematic analysis // J. of Applied and Computational Mechanics. V. 7. No. 4. P. 2113–2119. 2021.

7. Александров А.Ю., Тихонов А.А. Анализ устойчивости механических систем с распределенным запаздыванием на основе декомпозиции // Вестник СанктПетербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. Т. 17. Вып. 1. С. 13–26. 2021.

8. Мельникова М. Психология стресса: теория и практика: учебно-методическое пособие / М. Л. Мельникова - Екатеринбург, 2018.

9. Umarova A., Umarov A. *State of psychological stress from the point of view of control theory*// II international scientific conference «The modern vector of the development of science», Tokyo. Japan. January 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7560026>

10. Кубиддинова Р.А. Психология стресса (виды стрессовых состояний, диагностика, методы саморегуляции): учебно-методическое пособие. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2019. – 124 с.