



Радарын антены эргэлтийн системийн удирдлагыг загварчлах нь

Батчулууны Ганбаяр¹, Цэрэндондогийн Тэнгис^{2*}

¹Зэвсэгт хүчин, Тоон систем электрон автоматжуулалтын тасаг, Улаанбаатар, Монгол улс

²Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, Мэдээлэл, Холбооны Технологийн Сургууль, Улаанбаатар 13341, Монгол улс

*Холбоо барих зохиогч: tengis@must.edu.mn; ORCID:0000-0002-0580-7327

Өгүүллийн мэдээлэл: Хүлээн авсан: 2023.09.09; Зөвшөөрөгдсөн: 2023.10.01;
Нийтлэгдсэн: 2023.12.31

Хураангуй: "Монгол Улс нь өөрийгөө хамгаалах зэвсэгт хүчинтэй байна"[1] гэсэн үндсэн хуулийн заалтын хүрээнд өөрийн нутаг дэвсгэр, хил хязгаар, үндэсний аюулгүй байдлыг хамгаалах үүргийнхээ дагуу одоо ашиглагдаж буй агаарын орон зайд хяналт тавих радиолокацын станц (цаашид радар гэх)-ын техник хэрэгслүүдийг шинэчлэх, сайжруулах, аналог системээс дижитал буюу тоон системд шилжүүлэх, автоматжуулах ажлыг өдрөөс өдөрт маш хурдацтайгаар хөгжүүлсээр байна. Монгол Улсын хувьд Зэвсэгт хүчний Агаарын цэргийн зэвсэглэлд ашиглагдаж буй радарын антены эргэлтийн өнцгийг тодорхойлж агаарын орон зайд илэрсэн бай/цель/-г оновчтой илрүүлж тогтоох нь нэн чухал юм. Энэхүү өгүүллээр радарын антены эргэлтийн системийн удирдлагыг загварчилсан ба эргэлтийн өнцгийг тодорхойлох сельсин мэдрэгчийн гаралтын дохиог боловсруулах техник хангамжийн болон программ хангамжийн шинэ шийдлийг танилцуулж байна. Цэргийн мэдээллүүд нууцлалын зэрэгтэй тул энэхүү өгүүлэлд төхөөрөмжийн марк, техникийн үзүүлэлт мөн ном зүйг дурдах боломжгүй юм.

Түлхүүр үгс: Сельсин, энкодер, хөдөлгүүр, радар, тоон дохио

1. Оршил

Монгол Улсын агаарын хилийн орон зайг харж, хяналт тавих радарын техник, хэрэгслүүдийн хувьд шийдвэрлэх ёстой чухал асуудлын нэг бол зэвсэглэл, техникийн шинэчлэлт, сайжруулалт юм. Улмаар одоо ашиглагдаж буй зэвсэг, техникууд нь ажиллах ёстой хугацаанаасаа хэтэрч ажилласаар байна. Гэсэн хэдий ч өнөөдөр бид дотоод нөөц бололцоогоо ашиглан агаарын орон зайн хяналтаа бүрэн хэмжээгээр хянан ажиллаж байна.

Радар нь агаарын байг илрүүлж, тэдгээрийн байрлалын координатыг (алс, азимут)-аар тооцоолж, удирдах байранд автоматаар мэдээлэл дамжуулах үүрэгтэй [2]. Өндөр давтамжийн их чадлын цахилгаан соронзон импульсийг нэг чиглэлд цацруулж, тухайн чиглэлдэх байнаас ойсон долгионыг хүлээн авах, өөрөөр хэлбэл 2 тандах импульсийн хоорондох хугацаанд цахилгаан соронзон энергийн зарим хэсгийг хүлээн авах зарчим дээр станцын ажиллагаа үндэслэгдсэн байдаг [2]. Нэвтрүүлэх байгууламжаас гарсан хэт өндөр давтамжийн (VHF) их чадлын импульсийг (HF) өндөр давтамжийн гүйдэл хуулагчаар дамжуулан антены тусламжтайгаар агаарын орон зайд цацруулдаг.

Хүлээн авах явцад нэвтрүүлэгч ямар нэгэн дохио цацахгүй ба ойсон дохионы энергийг антен хүлээн авч цаашид нарийн боловсруулалт хийнэ [2]. Боловсруулсан эцсийн дохиог бай байдлаар дэлгэцэн дээр дүрсэлнэ.

Эдгээр системүүд нь ихэнх нь аналог системүүд байдаг ба сүүлийн үеийн тоон системүүдэд шилжүүлэх замаар сайжруулалт хийх боломжтой хэдий ч зарим техникийн шийдлүүдийг боловсруулаагүй байна.

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд радарын антенны эргэлтийн системийн удирдлагыг загварчилж, өнцгийг тодорхойлох мэдрэгчийг хөгжүүлэхийг зорьсон. Үүний тулд эхлээд бид өнцөг тодорхойлох мэдрэгчүүд болон тэдгээрийн радартай холбогдсон байдал, хэрэглээ болон мэдрэгчээс гарсан аналог дохиог тоон дохио болгон хувиргах судалгааг хийсэн. Радарын антенныг эргүүлэхийн тулд сельсин болон моторын тусламжтайгаар эргүүлдэг ба өнцгийг тодорхойлох явцад алдаа гарч байгаа учир үүнийг хэрхэн сайжруулах, техникийн үзүүлэлтийг нэмэгдүүлэх, зөвшөөрөгдөх алдааг багасгах мөн судалгааны ажлын эцсийн үр дүнг бодит системтэй хэрэгжүүлэх боломжийг судлахаар зорилоо.

2. Арга зүй

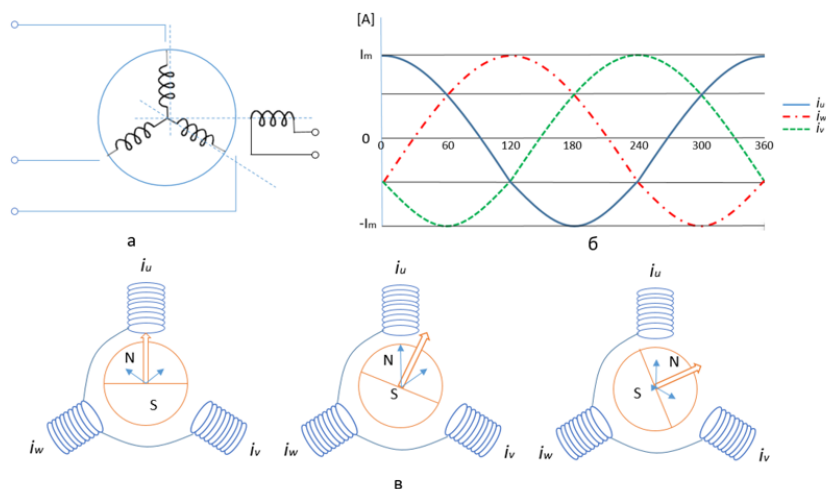
2.1. Радарын антенны эргэлтийн систем ба эргэлтийн мэдрэгчүүд

Радарын антенны эргэлтийн систем (АЭС) нь заагдсан талбайн параметрийг хэвтээ хавтгайд харах зориулалттай. Энэ систем нь 0-360°-ийн дотор хэвтээ хавтгайд антенныг тойрог хэлбэрээр эргүүлдэг. АЭС нь дараах үндсэн горимуудыг ашигладаг. Үүнд:

- тогтмол тогтоосон хурдтай тойрог бүхий эргэлт
- өгөгдсөн азимут дээр антенныг тохируулах
- тухайн азимутын секторт хяналт хийх.

Радарын антенны эргэлийн системд дараах төрлийн хөдөлгүүрүүдийг ашигладаг. Үүнд, тогтмол гүйдлийн мотор, хувьсах гүйдлийн мотор мөн гидравлик моторууд багтана.

Антенны эргэлтийн мэдрэгчт хамгийн түгээмэл хэргэлдэг хоёр төрлийн мэдрэгч байдаг, үүнд сельсин болон эргэлтийн энкодерууд багтана [3-4]. Сельсин гэдэг нь өнцгийн талаарх мэдээллийг дамжуулахад ашигладаг эргэдэг трансформаторын төрлийг хэлнэ [5]. Төхөөрөмж нь механик эргэлтийг цахилгаан дохио болгон хувиргах замаар өөр өөр бүрэлдэхүүн хэсгүүдийн хооронд өнцгийн мэдээллийг дамжуулах боломжийг олгодог [6]. Гурван фазын гүйдэл ба эргэлтийн талбайн хоорондын хамаарлыг Зураг 1-г үзүүлэв.



Зураг 1: а. Сельсины ороомог, б. Гурван фазын гүйдэл, в. Эргэлтийн талбай болон гүйдлийн хамаарал

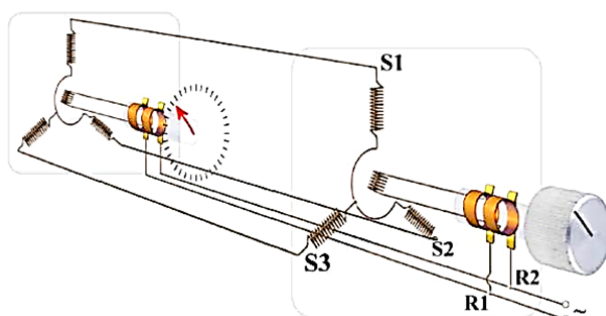
$$i_u = I_m \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

$$i_v = I_m \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.2)$$

$$i_w = I_m \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.3)$$

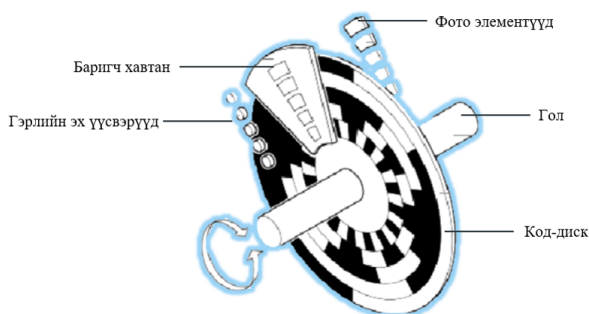
Энд: i_u, i_v, i_w – фазын гүйдэл; I_m – гүйдлийн хамгийн их хэмжээ; $\frac{2}{3}\pi$ – фазын зөрүү.

Гурван фазын гүйдэл тус бүр нь 120 градус ($2\pi/3$ рад)-ийн фазын зөрүүгээр адилхан тусгаарлагддаг. I_U, I_V, I_W фазын гүйдэл нь U, V, W гэсэн тэмдэглэгээтэй ороомгуудыг өдөөдөг. I_U гүйдэл нь 0 градус байх үед I_V гүйдэл нь 120 градусаар ($2\pi/3$ рад) хоцорсон фазын зөрүүтэй, харин I_W гүйдэл нь 120 градусын ($2\pi/3$ рад) фазын зөрүүгээр түрүүлж байгааг харж болно. Зураг 1 дээрх нимгэн сумтай векторууд нь ороомог тус бүрийн үүсгэсэн соронзон орныг илэрхийлдэг бол өргөн сумтай векторууд нь нийт соронзон урсгалын нийлбэр болох үр дүнд бий болсон соронзон орныг илэрхийлнэ [4-6]. Синхрон моторын эргүүлэх момент нь эргэлдэж буй соронзон орон ба роторын хоорондох фазын зөрүүгээр үүсдэг. Эргэж буй ротор ба эргэлдэх соронзон орны хооронд фазын бага зөрүүтэй үед эргүүлэх хүч бага байна. Фазын зөрүү нэмэгдэхийн хэрээр эргүүлэх момент нэмэгддэг бөгөөд энэ нь хөдөлгүүрт нэмэлт ачааллыг нэмсэнтэй холбоотой юм. Аналог системүүдэд 2 сельсин мэдрэгчийг индикаторын зарчмаар холбож эргэлтийн өнцгийг тодорхойлдог [12-14], үүнийг Зураг 2-т үзүүлэв.



Зураг 2: Сельсин мэдрэгчийг индикаторын горимд холбосон байдал

Антенны эргэлтийн системд хэрэглэгддэг өөр нэг төрлийн мэдрэгч нь эргэлтийн энкодер юм. Эргэлтийн энкодер нь цахилгаан мотор эсвэл хурдны хайрцгийн голын аль нэг хэсгийн эргэлтийг нарийвчлалтайгаар хэмжих боломжийг олгодог электрон төхөөрөмж юм [7-11]. Энэ нь эргэлтийн хөдөлгөөнийг цахилгаан импульс болгон хөрвүүлэх зарчимд тулгуурлан ажилладаг. Эргэлийн энкодерийн гол дээр кодолж нүхэлсэн диск байрладаг. Дискайн нэг талд гэрлийн эх үүсвэр (ихэвчлэн LED), эсрэг талд нь фото илрүүлэгч байрладаг. Диск эргэлдэж байх үед гэрлийн эх үүсвэр фотодетекторт тусах замаар код дамждаг. Энэхүү дискийг бид шифрлэх замаар шинэ кодыг үүсгэж болох ба энэ нь өнцгийн утгыг илэрхийлдэг болно. Үүнийг Зураг 3-т үзүүлэв. Хоёр мэдрэгчийн үндсэн ялгааг доорх Хүснэгт 1-д үзүүлэв.



Зураг 3: Өнцөг хэмжигч энкодер

Хүснэгт 1: Эргэлтийн энкодер болон сельсин мэдрэгчийн онцлогууд

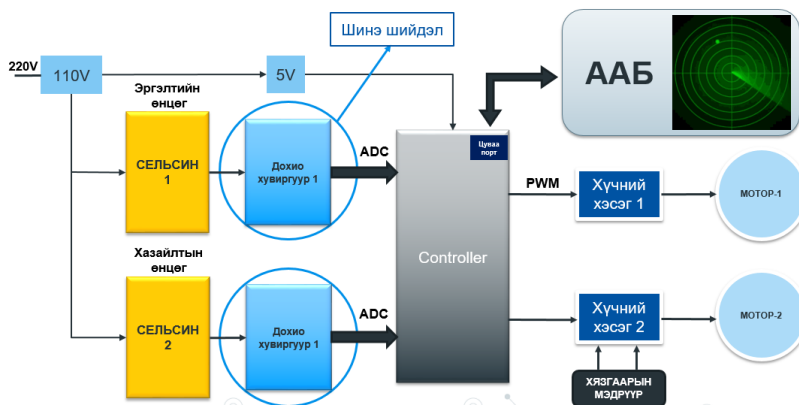
Онцлог	Эргэлтийн энкодер	Сельсин
Ажиллах зарчим	Эргэлтийг цахилгаан дохио болгон кодлох замаар өнцгийн байрлалыг хэмждэг	Өнцгийн байрлалын мэдээллийг дамжуулахын тулд трансформаторын зарчмыг ашигладаг
Гаралтын дохио ба өгөгдөл дамжуулалт	Хоёртын кодоор тоон гаралтыг үүсгэдэг. Дискрет цахилгаан импульс гарна. Төрөл бүрийн өгөгдөл дамжуулах боломжтой	Хүчдэл эсвэл гүйдэл хэлбэрээр аналог гаралтыг өгдөг. Тасралтгүй аналог дохиог дамжуулдаг. Үндсэндээ өнцгийн байршлын мэдээллийг дамжуулдаг
Нарийвчлал	Өндөр нарийвчлалтай гаралтыг хангаж чадна	Зарим энкодертой харьцуулахад ерөнхийдөө бага нарийвчлалтай байдаг
Ажиллах хурд	Өндөр хурдтай ажиллах чадвартай	Ихэнхдээ бага хурдтай хэрэглээнд ашигладаг
Орчны мэдрэмж	Тоос, чийг, хөндлөнгийн нөлөөнд мэдрэмтгий. Зарим төрөл нь температурт мэдрэмтгий байдаг	Хатуу ширүүн орчинд бат бөх, чичиргээнд тэсвэртэй. Ерөнхийдөө температурын өөрчлөлтөд бага мэдрэмтгий байдаг
Нарийвчлал	Төрөл, нягтрал зэргээс шалтгаалан өндөр нарийвчлалтай байж болно	Өнцгийн байршлын үнэн зөв мэдээллийг өгдөг
Чадал зарцуулалт	Чадал зарцуулалт нь төрлөөс хамааран өөр өөр байдаг	Чадал зарцуулалт харьцангуй бага
Хэмжээ, үнэ	Төрлөөсөө хамааран янз бүрийн хэмжээ, хэлбэр, үнэтэй байна	Ихэвчлэн авсаархан дизайнтай байдаг ба зардал багатай байж болно
Хэрэглээ	Байрлал мэдрэх, хөдөлгөөнийг хянах зориулалтаар өргөн хэргэлдэг. Мөн робот техник, хөдөлгөөнийг удирдахад ашигладаг	Удирдлагын системд өнцгийн байрлалыг алсын зайнаас мэдрэхэд голчлон ашигладаг. Удирдлагын системд гэдрэг холбооны төхөөрөмж болгон ашигладаг

2.2. Санал болгож буй эргэлтийн мэдрэгчийн шийдэл болон удирдлага

Монгол улсад ашиглагдаж байгаа хуучны радарын эргэлтийн систем нь аналог мэдрэгч буюу сельсинийг ашигладаг. Сельсины давуу талыг дээрх хүснэгтээс харахад гадаад орчны хүнд нөхцөлд ажиллах чадвартай бөгөөд шуугианд тэсвэртэй байдаг.

Сельсин нь эргэлтийн хөдөлгүүрийн системд хамт суурилагдсан байдаг ба энэхүү холболтыг салгахгүйгээр мэдрэгчээс ирж буй аналог өгөгдлийг тоон болгон хувиргах техник болон программ хангамжийн шинэ шийдлийг боловсруулсан. Гаднын зах зээлд дээр энэхүү дохиог боловсруулдаг олон төрлийн чипүүд байдаг хэдий ч жилийн жилд тухайн чипийн үнэ өсөхөөс гадна зах зээлд хомс болж байна. Бидний зохион бүтээсэн энэхүү шийдэл нь тухайн хэрэгцээг хангах боломжтой юм.

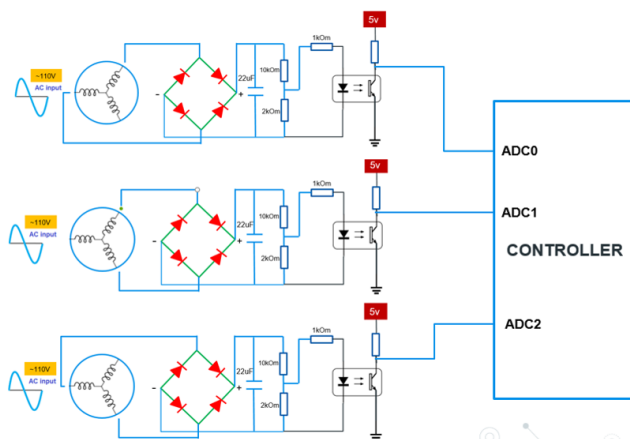
Антенны удирдлагын блок схемийг доорх Зураг 4-д үзүүлэв.



Зураг 4: Радарын антенны эргэлтийн системийн удирдлагын ерөнхий блок схем

Бидний сонгосон мэдрэгч болох сельсин нь хувьсах 110В тэжээгддэг. Хоёрдогч ороомог дээрх хүчдэл нь эргэлтийн өнцгийн байрлалаас хамааран хувьсах 0 – 30В амплитудтай байна. Өнцгийн боловсруулалт хийх схемийн шийдлийг доорх Зураг 5-д үзүүлэв.

Нэг болон хоёрдугаар ороомгоос үүсэж буй хувьсах хүчдэлийг ST-180E шулуутгуур хэрэглэн шулуутгаж, үүнийг 50В, 22мкФ конденсаторын тусламжтай шүүнэ. Шулуутгуураас үүссэн тогтмол хүчдэлийг 10 кОм болон 680 Ом эсэргүүцлийн тусламжтай хүчдэл хуваагч ашиглан бууруулна. Үүнээс үүссэн дохиог РС817 опто-тусгаарлагч ашиглан микроконтроллер руу дамжуулна. Опто-тусгаарлагч дээрх эсэргүүцлийн хэмжээг бид 1кОм болон 10кОм байхаар тооцоолсон. Ороомгоос үүссэн дохио нэгдсэн газартай байж болохгүй тул опто-тусгаарлагчийг хэрэглэсэн. Үүнтэй адил нэг болон гуравдугаар ороомог мөн хоёр болон гуравдугаар ороомгийг холбон хувиргана.



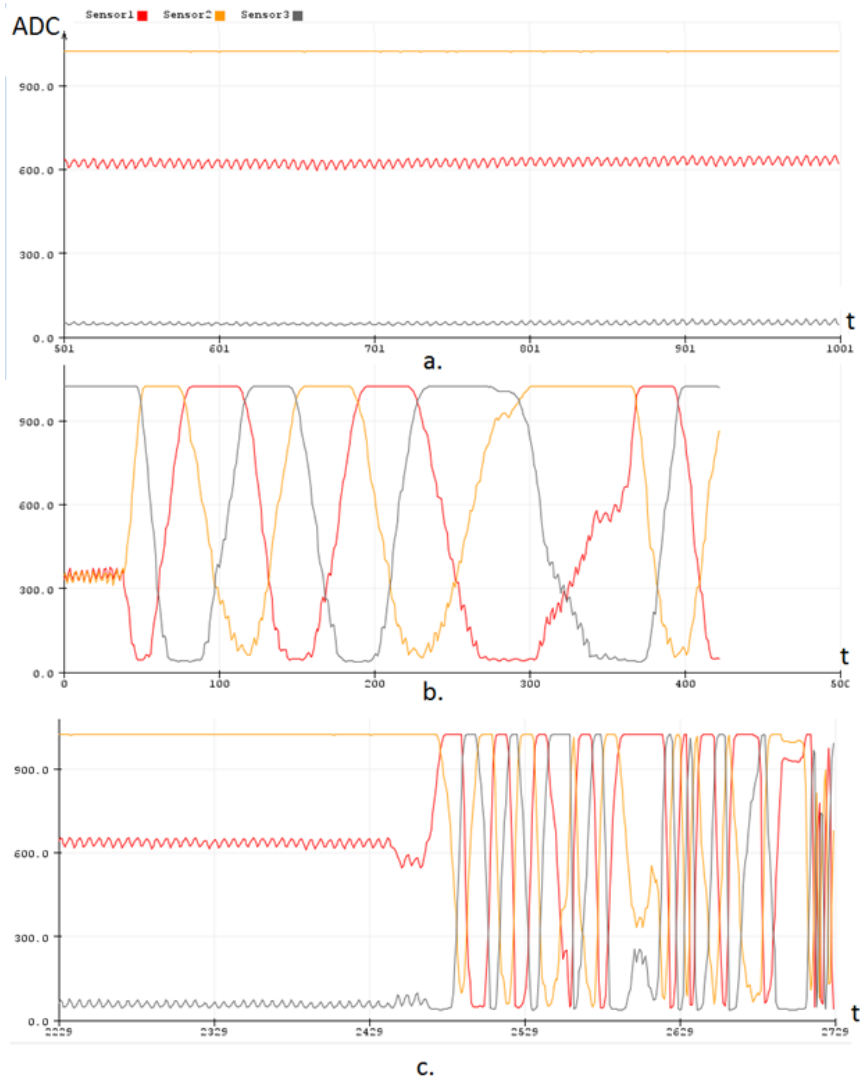
Зураг 5: Сельсин мэдрэгчийн холболтын схем

Опто-тусгаарлагч дээрх диодын хаагдах хүчдэлийн мужаас хамааран, сельсины тодорхой эргэлтийн өнцгүүд дээр дохио тайралтад орно.

Энэхүү тайралтын мужид өнцгийг тодорхойлох боломжгүй болно. Нэг фаз дээр тайралтад ороход нөгөө 2 фаз дээр үүссэн хүчдэлийн төвшнийг ашиглан өнцгийг тооцоолж болно.

3. Үр дүн

Бид энэхүү схемийг бодитоор угсарч туршсан болно. Доорх Зураг 6-д сельсин эргээгүй үеийн болон бага хурдаар эргэж буй мөн эргэлтийн хурд нэмэгдэж буй хэмжилтийн үр дүнг үзүүлэв. Сельсин мэдрэгчээс фазын зөрүүтэй өнцгийн утгыг авч байгааг графикаас харж болно.



Зураг 6: Сельсины өгөгдөл. а. Сельсин хөдөлгөөнгүй үеийн, б. бага хурдаар эргэж буй, с. эргэлтийн хурд нэмэгдэж буй үеийн үр дүнгүүд

Энэхүү өгөгдлийг бид микроконтроллерын 10 битийн аналог-тоон хувиргуур хэрэглэн уншиж авсан. Контроллер дээр эргэлтийн өнцгийг доорх томьёог ашиглан тооцоолно. Энд бид φ_1 , φ_2 , φ_3 – фазыг 120° зөрүүтэй гэж авч үзсэн. L1, L2, L3 утгууд аналог-тоон хувиргуурын утга ба А агуургын утгыг 512 гэж тооцоонд ашигласан.

$$L1 = A * \sin(\theta + \varphi_1) \quad (3.1)$$

$$L2 = A * \sin(\theta + \varphi_2) \quad (3.2)$$

$$L3 = A * \sin(\theta + \varphi_3) \quad (3.3)$$

Эндээс бид өнцгийг тооцоолно.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{L1}{A}\right) - \varphi_{1,2,3} \quad (3.4)$$

Энд: $L1, L2, L3$ - ороомгуудын утга; A - агуурга; θ - өнцөг; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - фаз.

4. Дүгнэлт

Энэхүү ажлын хүрээнд радарын антены эргэлтийн системийн өнцгийг тодорхойлдог Сельсин мэдрэгчийн судалгааг хийсэн ба уг мэдрэгчийн утгыг боловсруулах боломжтой техникийн болон программ хангамжийн шинэ шийдлийг гаргасан. Гаднын үнэтэй мөн олдоц багатай схемийг бидний хийсэн шийдлээр орлуулах боломжтой байна. Радарын антены эргэлтийн системийн аналог шийдлийг бид тоон систем руу хөрвүүлэх боломжтой. Үүнээс гадна бид хөдөлгүүрийн удирдлагын хэсгийг шийдэж антены эргэлтийг цагийн зүүний дагуу, эсрэг мөн антеныг хазайлгах боломжтой болсон.



Цаашид хурдтай салхинаас үүсэх эргэлтийн алдааг ПИД удирдлагын аргыг хэрэгжүүлэн сайжруулах боломж бүрдэж байна. Энэхүү судалгааны ажлын эцсийн үр дүнг биет бүтээл болгож бодит системд хэрэгжүүлэх боломжийг судалж байна.

Ном зүй

- [1] "МОНГОЛ УЛСЫН БАТЛАН ХАМГААЛАХ ТУХАЙ," 2016 оны 09 дүгээр сарын 01-ний өдөр.
- [2] M. Brancazio, "Radar Signal Processing," *CreateSpace Independent Publishing Platform*, May 5, 2017.
- [3] Л. А. Васильевич, "Микросхема преобразования сигналов трансформаторных датчиков положения," *Москва*, 26 апреля, 2017.
- [4] А. Л. Шестаков, "Разработка лабораторного стенда для исследования точности сельсинной передачи," *Выпускная квалификационная работа, Южно-Уральский государственный университет*, 2019.
- [5] В. Ануфриев, А. Лужбинин, Сергей Шумилин, "Микросхема преобразователя угол-код для индуктивных датчиков," *Современная электроника*, № 3, 2015.
- [6] Ануфриев В., Лужбинин А., Шумилин С., "Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений," *Современная электроника*, № 4, 2014.
- [7] Прокофьев Г., Стахин В., Обеднин А., "К1382НХ045 – микросхема преобразователя фазы квадратурного сигнала в код положения," *Современная электроника*, № 6. 2014.
- [8] M. Najuib, K. Gamal, and Alaa S. Hafez, "Design and Implementation of Digital Azimuth Encoder for Radar Antennas Using Microcontroller," *Faculty of Engineering, Alexandria University, Egypt*.
- [9] Visnyi, P., "Novel method of A/D conversion for incremental position sensors," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE '96., Warsaw*, 1996.
- [10] J. Ahn, S. Park, and D. Lee, "Novel encoder for switching angle control of SRM," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, no. 3, Dec., pp. 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.874278>.
- [11] S. Park, J. Ahn, M. Lee, Lipo, and T.A., "Novel encoder for SRM drive with high-resolution angle control," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2001, Pusan*, 2001.
- [12] В. А. Олер, "Converter Of The Shaft Turn Angle Into Electrical Data Signal," 2007.

- [13] "Однофазные контактные и бесконтактные сельсины," *Учебное пособие, Самарский государственный технический университет*, 2012.
- [14] Г.Цфасман, "Устройство ввода в аступ информации от сельсинного датчика углового положения," *Учебное пособие, Москва*, 2011.
- [15] F. P. Ramsey, "A Mathematical Theory of Saving," *The Economic Journal*, Vol. 38, no. 152, Dec., pp. 543-559, 2002, doi: <https://doi.org/10.2307/2224098>.

Modeling the control of a radar antenna rotation system

Ganbayar Batchuluun¹, and Tengis Tserendondog^{2*}

¹*Department of Digital Systems and Electronic Automation, Mongolian Armed Force, Ulaanbaatar, Mongolia*

²*School of Information and Communication Technology, Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar 13341, Mongolia*

**Corresponding author: tengis@must.edu.mn; ORCID:0000-0002-0580-7327*

Article Info: Received: 2023.09.09; Accepted: 2023.10.01; Published: 2023.12.31

Abstract: Following the constitutional provision stating that “Mongolia has an armed force for self-defence” [1], and fulfilling its duty to safeguard its territory, borders, and national security, the technical equipment of the radar station, which monitors the current airspace, is undergoing rapid development. This involves updating and improving the system, as well as transitioning from analogue to digital, with the automation process progressing swiftly day by day. For Mongolia, it is very important to determine the angle of rotation of the radar antenna used in the armament of the Air Force of the Armed Forces and determine the target detected in the airspace. This paper introduces a novel hardware and software solution for simulating the control of a radar antenna rotation system and processing the output signal of a Selsin sensor to determine the rotation angle. Due to the confidentiality of military information, this article does not include device brands, specifications or bibliography.

Key words: selsyn, encoder, motor, radar, digital signal
