

# Механикчийн чагнуураар автомашины моторын гэмтлийг оношлох систем

Ч.Билгүүн, Б.Гэрэлмаа, Ч.Лодойравсал  
Электроник Холбооны Инженерчлэлийн Тэнхим  
Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан Инженерчлэлийн Сургууль  
Монгол Улсын Их Сургууль  
ulaan\_rockr@yahoo.com

**Хураангуй**— Энэхүү ажилд моторын дуугаар гэмтлийг оношлох автомат системийг хөгжүүлэх судалгааны эхний үр дүнг танилцуулна. Системийг хөгжүүлэх явц нь өгөгдөл цуглуулах, өгөгдлийг боловсруулах, мэдлэгийн сан үүсгэх, хэрэглэгчийн төхөөрөмж хөгжүүлэх гэсэн шатлалтай бөгөөд энэ өгүүлэлд дуу бүртгэх, өгөгдөл цуглуулах систем болон анхан шатны боловсруулалтын дүн шинжилгээг дурдана. Дуу бүртгэх нөхцлийг сайжруулахад механик чагнуур ашигласан нь өмнө хийгдэж байсан судалгаануудтай харьцангуй шуугианаас ангид болсоныг туршилтаар баталгаажуулсан. Өмнө хийгдэж байсан төстэй судалгааны үр дүнгээс хамгийн тохиромжтой Support Vector Machine (SVM) болон Чадлын Нягтын Функц (Spectral Density Function - SPD) дээрхи Artificial Neural Network (ANN) гэсэн 2 аргыг ашиглан боловсруулж харьцуулалт хийсэн.

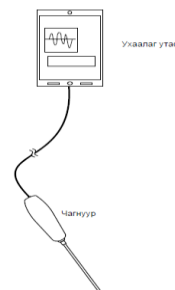
Дээрхи дүн шинжилгээгээр уг систем нь шуугианыг амжилттай дарсан бөгөөд SVM, SPD анализуудын үр дүн өмнө хийгдэж байсан ажлуудын утгуудтай таарч байна.

**Түлхүүр үг**— Моторын гэмтэл оношлох автомат систем, Механик чагнуур, ANN, SVM

## I. УДИРТГАЛ

Өнөө үед автомашины хэрэглээ зогсолтгүй өсөж байгаа ба түүнийг хамгаалах, арчилах асуудал нь олон хүний хувьд асуудал болж байна. Үүнийг шийдэх хамгийн оновчтой шийдэл нь моторын дууны дохиог ашиглан оношлогоо хийх юм. Машины моторын дууг боловсруулан гэмтлийг оношлох хэд хэдэн оролдлогууд өмнө нь хийгдэж байсан ба үр дүн нь хэрэглэж буй аргаасаа хамааран 76%-95%-ийн нарийвчлалтай байсан [1-5]. Эдгээр ажлуудын онцлог нь хэмжилтийг лабораторийн буюу нэмэлт гадны шуугиан харьцангуй бага нөхцөлд хийсэн бол янз бүрийн орчинд нэг загварын машины моторуудаас дууны дохиог [1] –дээр хураан авсан байсан. Гэтэл түүний үр дүн нь маш хангалтгүй буюу 9-н удаа туршилт хийхэд нь ердөө 5-н дохиог зөв ангилсан. Үүнээс үзэхэд хэмжилтийг зөв хийхэд гадны шуугианы үзүүлэх нөлөө их байгаа тул дээрхи нарийвчлал өндөртэй системүүдийг амьдрал дээр хэрэглээний түвшинд ашиглахад хэцүү юм.

Энэхүү ажлаар дохиог гадны шуугианаас ангид, өндөр чанартайгаар, хэрэглэхэд хялбар байх дуу бүртгэх системийн саналыг дэвшүүлсэн юм. Системийн ерөнхий бүдүүвчийг Зураг 1-т харуулав.



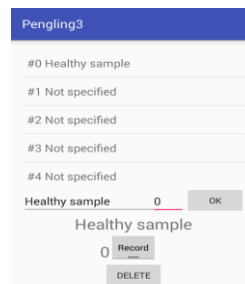
Зураг 1.

## II. СИСТЕМ ХӨГЖҮҮЛЭЛТ

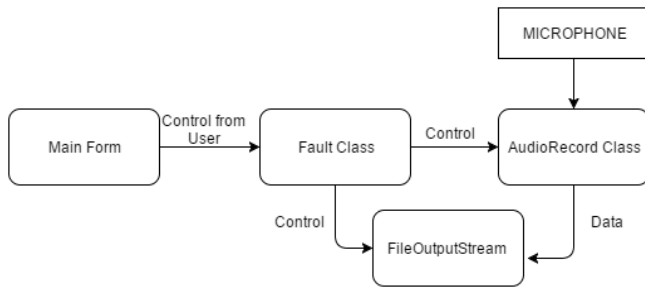
### A. Програм хангамжийн загварчлал

Энгийн дуу бүртгэх програмууд нь энгийн хэрэглээнд зориулсан учир дууны дохиог өндөр түвшинд бичиж чаддаггүй ба хураан авсан өгөгдлүүдийг хооронд нь ялгахад хэцүү. Эдгээр шалтгааны улмаас түүвэрлэлтийн үүсгэх алдааг хамгийн бага байлгахын тулд 16-битийн PCM форматтай, 44100Hz-ийн түүвэрлэлтийн хурдтай, хэрэглэхэд хялбар програмыг “Android” үйлдлийн системийг сонгож дуу бүртгэх програмаа хөгжүүлсэн.

Энэхүү програмын Graphical User Interface (GUI) болсон үндсэн форм болон түүн доторх байгуулагчуудыг Зураг 2-д, алгоритмийн блок диаграммыг Зураг 3-д харуулав. Хэрэглэгчээс GUI-аар дамжуулан авсан командыг тухайн моторын ангилалыг илэрхийлсэн Fault объект боловсруулж “AudioRecord Class” болон “FileOutputStream” хоёрыг удирдаж дууг Raw хэлбэрээр хураана. Эцэст нь уг мэдээллийг түүнд харьяалагдах Fault объектийн нэрээр үүсгэсэн фолдер дотор, дохиог хурааж авсан цаг болон дууны дугаарын комбинацаар нэрлэсэн Waveform Audio File Format (WAV) төрлийн файл болгон хадгална.



Зураг 2. Хэрэглэгчийн График Интерфейс



Зураг 3. Програмын алгоритмийн блок диаграм

### В. Техник хангамжийн загварчлал

Моторын дууны давтамж нь 50-3000Hz –ийн давтамжийн зурваст байдаг [6]. Хүний хоолой, ихэнхи хөгжим, зарим тэжээвэр амьтад болон маш олон зүйлсийн унаган давтамж нь энэ мужид байдаг тул гадны шуугианыг програмын аргаар ялгахад амаргүй [7]. Иймээс дараах механик дуу бүртгэх системийг хэрэгжүүлсэн.

Дуу хураагчийнхаа үндсэн микрофоныг сонгохын тулд ухаалаг утастай холбогдож ажилладаг 2 төрлийн микрофоныг авч үзье. Ухаалаг утасны өөрийн микрофон нь 6,5м дотор буюу хэтэрхий холоос дууг хурааж авч байгаа нь манай хэмжилтэнд шуугианы нөлөөллийг ихэсгэх тул тохиромжгүй юм. Үүний эсрэгээр чихэвчний микрофоны дууг хурааж чадах хамгийн хол зай нь 0,5м байгаа боловч гадны шуугианд мэдрэг байгаа тул, эдгээр микрофонуудыг дангаар нь хэрэглэх боломжгүй юм. Иймд нэмэлтээр механикчийн чагнуур /stethoscope/-ийг, чихэвчний микрофоны хамт хэрэглэсэн.

Механикчийн чагнуур нь мэдрэгч, дуу дамжуулах хоолой, чихэвч гэсэн гурван ширхэг бүрэлдэхүүн хэсгүүдээс тогтдог. Үүнээс үзэхэд микрофоныг байрлуулах боломжтой 4-н ширхэг байрлал байна. Хүснэгт 1-д байрлал тус бүрд дууны үүсгэвэрт холбосон болон холбоогүй үеийн дууны дохионы энергийн хэмжилтийг харуулав. Үүсгэвэрээс гарах дохионы энерги нь 52 db.

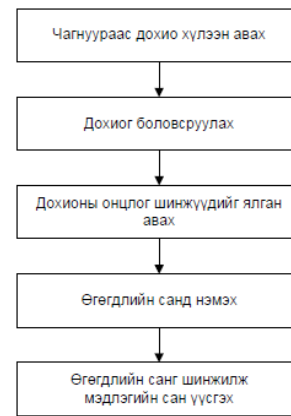
Хүснэгт 1

Байрлал	Холбосон	Холбоогүй
Мэдрэгчийн үзүүрт	49db	43db
Мэдрэгч-Хоолой	18db	0db
<b>Хоолой-Чихэвч</b>	<b>30db</b>	<b>0db</b>
Чихэвчний үзүүр	20db	12db

Үүнээс үзэхэд микрофон байрлуулах хамгийн тохиромжтой байрлал нь холбогч хоолой болон Чихэвч хоёрын хооронд юм.

### III. Өгөгдлийн шинжилгээ

Системийг шалгахад зориулж 30-н эрүүл мотортой машинаас 89, гэмтэлтэй 3-н машинаас 11 ширхэг дуу хураасан. Харин өмнө хийгдэж байсан туршилтуудаас ялгаатай нь энэхүү өгөгдлийн сан маань төрөл бүрийн мотороос бүрэлдсэн ба дууны дохиог гадаа, дотор, шуугиантай, хүмүүсийн яриан дунд гэх мэт янз бүрийн орчинд хураасан. Дүн шинжилгээнд хэрэгтэй өгөгдлийн санг бүрдүүлэх дарааллыг Зураг 4-т харуулав.



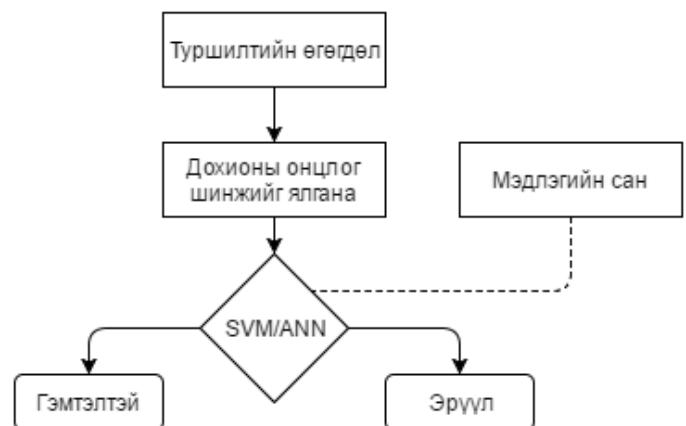
Зураг 4. Өгөгдлийн сан боловсруулах дараалал

### А. Анализ хийх арга.

Юуны өмнө дээр үзүүлсэн системийг ашиглан цуглуулсан болон энгийн микрофоноор бичсэн өгөгдлүүд дээр анализ хийж ажиллагааг шалгах хэрэгтэй. Үүний тулд нэг мотороос авсан 2-төрлийн дохионы ялгаварыг олж түүний чадлыг олох хэрэгтэй. Энэ нь шуугианы чадлыг илэрхийлнэ.

Систем нь үр дүнтэй байгаа эсэхийг судалсаны дараа моторыг эрүүл эсэхийг таних алгоритм хэрэгтэй. Статистик болон Artificial Neural Network (ANN) төрлийн хэд хэдэн аргууд дундаас Support Vector Mahine (SVM), Multilayer Perception (MLP), CHAID Pearson зэрэг алгоритмууд нь, лабораторийн нөхцөлд 3-н машинаас хураан авсан дохиог ялгахад бусдаасаа илүү байгааг баталсан [2]. Мөн [4] ажил дээр мотоциклын чимээгүй орчинд бичсэн дууг Wavelet Packet Decomposition болон ANN-ийг ашиглан өндөр нарийвчлалтай ялгаж эрүүл эсэхийг таньж байсан.

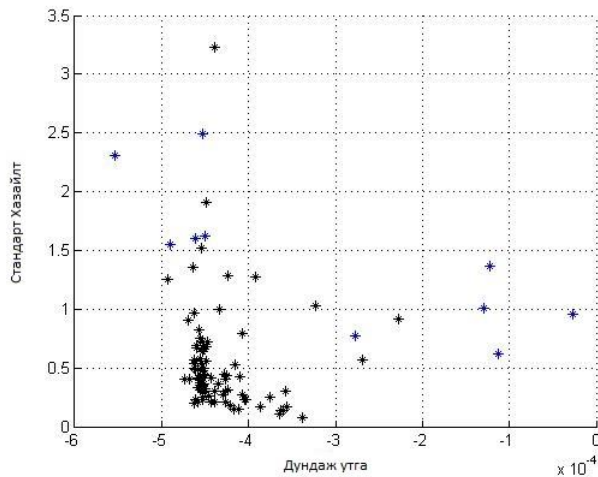
Гэтэл [1] ажил нэг загварын 9-өөр машины дууг янз бүрийн нөхцөлд хэмжиж үзсэн учир систем нь өмнө дурьдагдсан ажлууд шиг хангалттай сайн ажиллаж чадаагүй. Энэ бүгдээс үзэхэд моторын дуу танигч системийг сайжруулж хэрэглээний түвшинд ойртуулахын тулд [1] ажил дээр хэрэглэсэн Spectral Power Density (SPD) анализ болон SVM хоёрыг энэхүү судалгаанд ашиглах нь зүйтэй. Өгөгдөл боловсруулах ерөнхий блок диаграмыг Зураг 5-т харуулав.



Зураг 5. Өгөгдөл анализ хийх системийн блок диаграм

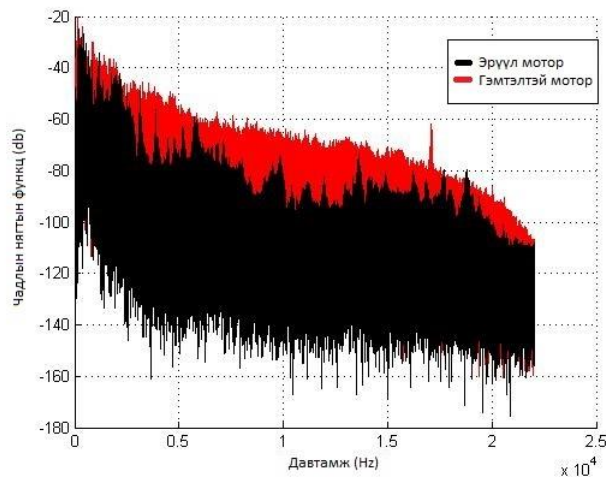
### В. Өгөгдлийг боловсруулах

Цуглуулсан дохио болгоноос дундаж, хамгийн олон давтагдсан утга, энерги, хамгийн их утга, хамгийн бага утга, стандарт гажилт, болон хазайлт зэрэг 7-н утгыг авч SVM анализ хийсэн. Зураг 6 гэмтэлтэй болон эвдрэлтэй моторыг ялгахад хамгийн хялбар байгаа 2 төрлийн утгууд болох дундаж болон дундаж хазайлтыг харуулав. График дээрээс харахад зарим мужид эрүүл болон гэмтэлтэй моторын хэмжилт давхцаж буй тул нэмэлт үзүүлэлт эсвэл шинжилгээ шаардлагатай.

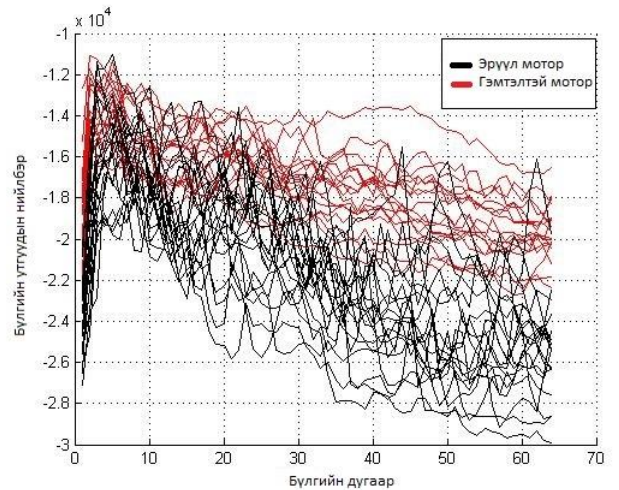


Зураг 6. Өгөгдөл болгоны дундаж утга болон стандарт хазайлт

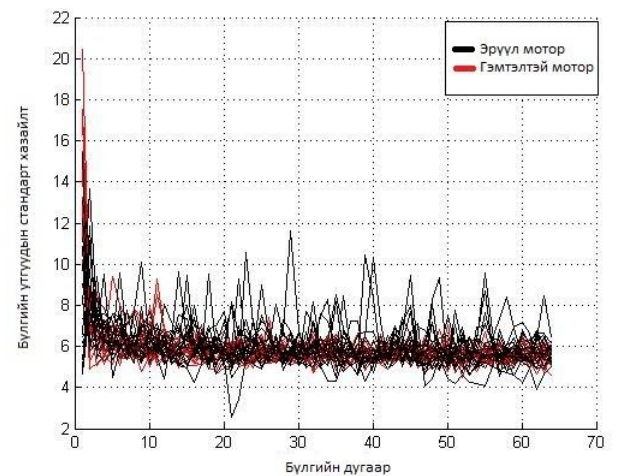
Харин чадлын спектрийн нягт (SPD)-ийг шинжлэхдээ дохио болгоны чадлын нягтын функцийг тус бүр 256-н утгуудаас бүрдэх 64-н ширхэг бүлгүүдэд хуваасан. Үүний дараа бүлэг бүрийн утгуудын нийлбэр болон стандарт хазайлтыг бодож Back propagation ANN-ийг ашиглан дохионуудыг ангилсан. Уг өгөгдлийг боловсруулсан дарааллуудын үр дүнгүүдийг Зураг 8-д үзүүлэв. Дан SPD функц дээр боловсруулалт хийхэд хүндрэлтэй байгааг Зураг 7а-аас харж болно. Бүлэглэл хийсний дараа Зураг 7b,c-д үзүүлсэнчлэн гэмтэлтэй моторын чадал нь өндөр давтамжид эрүүл моторынхоос илүү байна. Түүнчлэн дээрх утгуудаар Matlab програмын neural network tool [8], SVMstruct [9] зэргийг ашиглан боловсруулалт хийсэн.



(a)



(b)



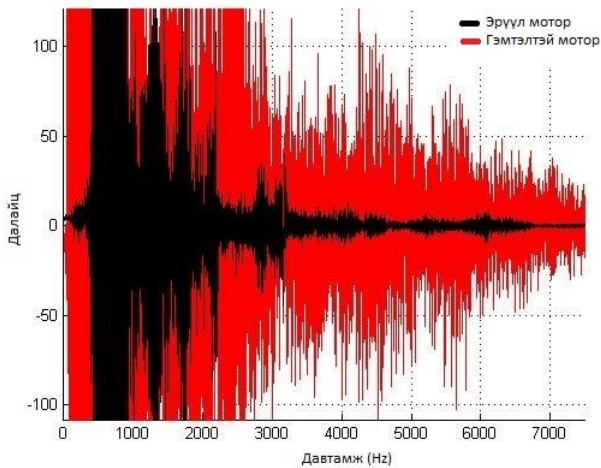
(c)

Зураг 7. Өгөгдөл боловсруулах үе шатуудын үр дүн, (a) Өгөгдөл бүрийн SPD функц, (b) Бүлэг бүрийн утгуудын нийлбэрийн функц, (c) Бүлэг бүрийн стандарт хазайлтын утгууд

### IV. Үр дүн

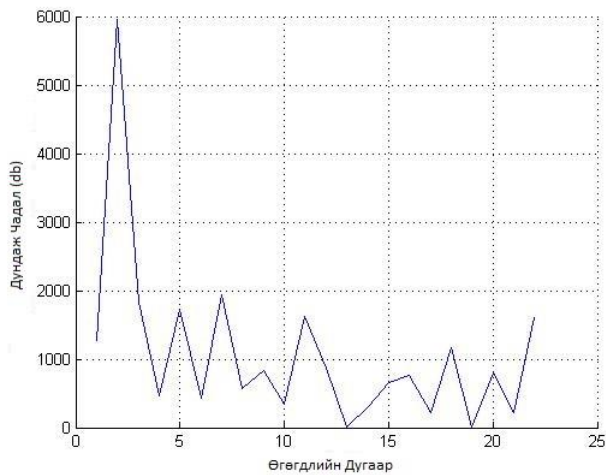
#### А. Шуугианы шинжилгээ

Механикчийн чагнуур ашигласан дуу бүртгэх систем болон энгийн микрофоноор бүртгэсэн дуу хоёрын давтамжийн муж дахь спектрийг Зураг 8-т харуулав. Эндээс энгийн микрофоны бүртгэсэн дохионы далайц манай систем бүртгэсэн дохионьхоос харьцангуй их, ялангуяа 3кГц-ийн давтамжаас дээш нэмэлт шуугиан ихтэй байна. Мөн 400-аас доош давтамжид систем бүртгэсэн дохионы далайц бага байгаа нь микрофон хэт нам давтамжид ажиллаж чадахгүй байгааг илтгэж байна.



Зураг 8. Дууны дохионуудын давтамжийн спектр

Энгийн болон механикчийн чагнуураар бүртгэсэн дохио болгоны өндөр давтамж дахь дундаж чадлуудын ялгаврыг Зураг 9-т харуулав. Эндээс үзэхэд систем нь энгийн микрофоныг бодвол гадны шуугианд харьцангуй ангид байгаа тул үүнээс цааших боловсруулалтад механикчийн чагнуур ашигласан системийн бүртгэсэн өгөгдлүүдийг ашиглав.



Зураг 9. Хоёр төрлийн дохионуудын өндөр давтамжийн дундаж чадлуудын ялгавар

### B. SPD анализ

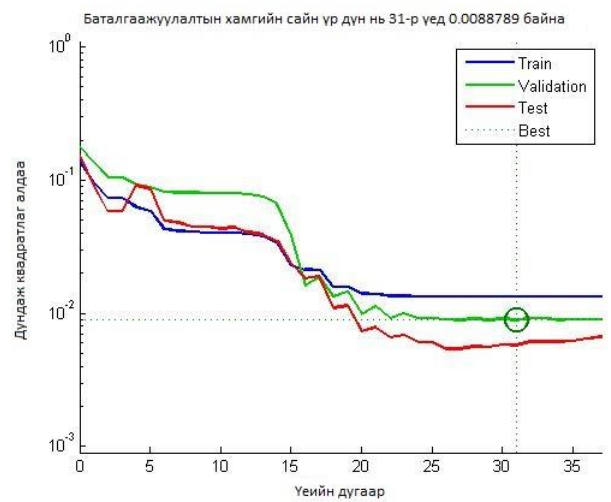
Дээр дурьдсан аргаар боловсруулсан эрүүл моторын 89, гэмтэлтэй моторын 11 нийт 100-н өгөгдлийн, нийлбэрийн болон стандарт хазайлтын 128-н утгуудаар 100x128 хэмжээстэй өгөгдлийн болон 100x1 хэмжээстэй гаралтын матрицуудыг байгуулсан. Нийт өгөгдлийн 50% ийг ANN-ыг сургахад, 25% ийг баталгаажуулахад, үлдсэн 25% ийг уг системийг шалгахад хэрэглэсэн [2]. Үүний дараа ANN-ий нуугдмал зангилааны хамгийн тохиромжтой утгыг сонгох шаардлагатай байсан тул 1 ээс 128 хүртэлх зангилаан дээр эмпирик шинжилгээ хийсэн. ANN нуугдсан зангилааны тоог хэд хэдэн удаа өөрчилж үзсэн. Өгөгдлийг ялгах уг алгоритмын өөрийнх нь шинж чанараас хамааран гүйцэтгэлийн чанар нь динамик байсан тул нэг зангилааны утганд хэд хэдэн удаа туршилт хийх шаардлагатай болсон ба 20-н удаагийн төстийн алдааны хувиудаар

шинжилсэн утгуудыг хүснэгт 2-д харуулав. #HN гэдэг нь нуугдмал зангилааны тоог илэрхийлнэ.

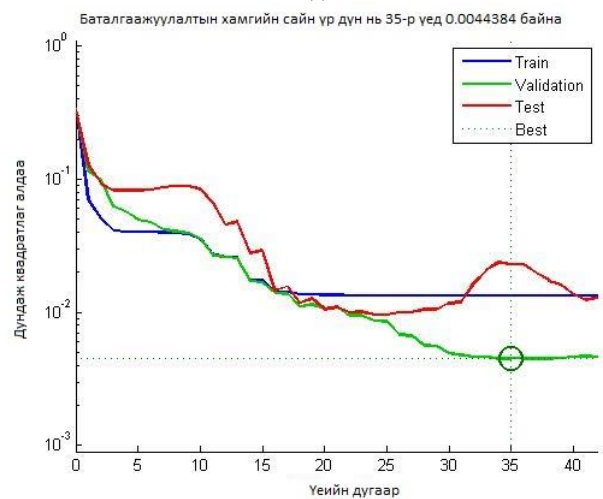
Хүснэгт 2. ANN тус бүрийн алдааны хувиудаар шинжилсэн үр дүн

#HN	1	2	4	8	16	32	64
Max	16%	16%	16%	12%	<b>12%</b>	20%	16%
Avg	5.7%	5%	5%	3.4%	<b>2.8%</b>	5.2%	5%
Min	0%	0%	0%	0%	<b>0%</b>	0%	0%
Std	4.3%	4.3%	4.5%	3.7%	<b>3.7%</b>	5.7%	5.1%

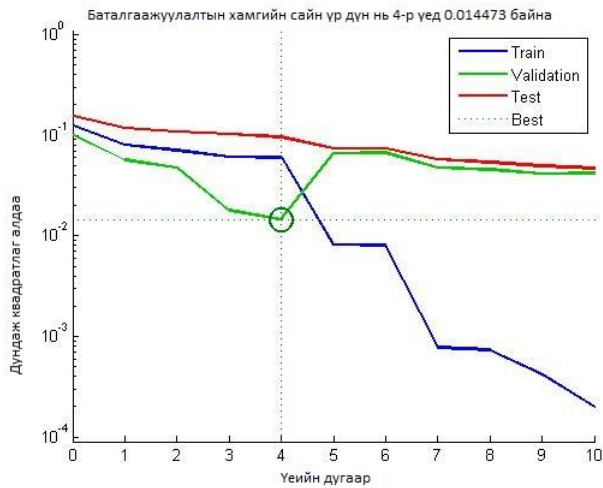
Үүнээс үзэхэд нуугдмал зангилааны тоо 16 байхад дундаж алдааны хувь нь хамгийн бага байна. Гэхдээ ANN –ийн өөрөө динамик шинж чанартай тул үүнийг бүрэн оновчтой утга хэмээн үзэж болохгүй. Зураг 10–д 16-н нуугдмал зангилаатай системийн 0%, 4%, 12% ийн алдаатай ажилласан үеийн үзүүлэлтүүдийг харуулав.



(a)



(b)



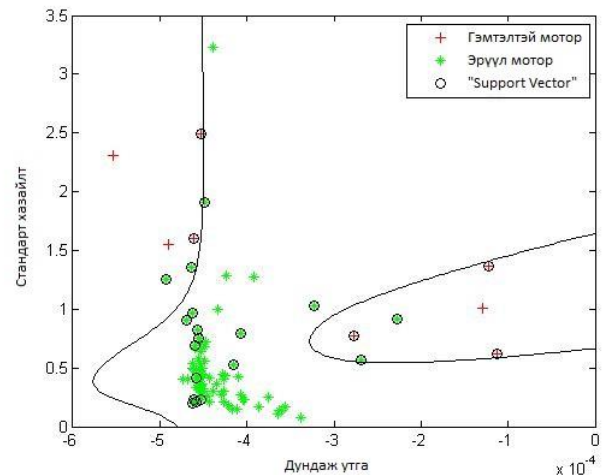
Зураг 10. ANN-ийн үзүүлэлтийн функцууд (a) 0% -ийн алдаатай үеийн үзүүлэлтийн функц, (b) 4% -ийн алдаатай үеийн үзүүлэлтийн функц, (c) 12% -ийн алдаатай үеийн үзүүлэлтийн функц

### C. SVM анализ

Өмнө дурдсанчлан 100 дохио бүрээсээ 7-н ширхэг утга аван  $100 \times 7$  хэмжээтэй өгөгдлийн матриц үүсгэв. Түүнийхээ 90% ийг системийг сургахад, үлдэнийг нь шалгахад ашигласан. Гэхдээ энэ өгөгдлийн матриц нь [2] ажилд ашигласан  $4480 \times 7$  матрицийг бодвол харьцангуй бага байгаа тул хэмжилт болгоныг хэвийн дохио дундаас 8, гэмтэлтэй машины дохио дундаас 2 утгыг санамсаргүй байдлаар сонгож хийсэн. Мөн SVM алгоритмд хамгийн тохиромжтой кернел функцийг сонгох ёстой тул Linear, Quadratic, Polynomial, Gaussian Radial Basis, Multilayer perceptron зэрэг 5-н функц тус бүрд 10-н ширхэг хэмжилт хийсэн. Үр дүнг нь хүснэгт 3-д харуулав. Харж байгаачлан хамгийн өндөр үзүүлэлтийг Polynomial функц харуулсан ба түүний үр дүнг Зураг 11-т дохионы дундаж утга болон стандарт хазайлтын талбар дээр харуулав.

Хүснэгт 3. Кернел функц тус бүрийн алдаагүй ажиллагааны хувь дээр хийсэн анализийн үр дүн

	Linear	Quadratic	Polynomial	rbl	mlp
Max	100%	90%	<b>100%</b>	100%	90%
Avg	82%	88%	<b>94%</b>	92%	72%
Min	70%	80%	<b>90%</b>	80%	50%
Std	12.3%	4.2%	<b>5.1%</b>	7.8%	12.3%



Зураг 11. Polynomial функцийн дохионы дундаж болон стандарт хазайлтын талбар дээрхи үзүүлэлт

## V. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү ажлаар машины дуу таних системийг хэрэглээний түвшинд хөгжүүлэхэд саад болж буй гол асуудал болох гадны нөлөөллийг арилгах гэж оролдсон. Энэхүү ажилд дэвшүүлсэн систем нь гадны шуугианыг харьцангуй сайн дарсан гэдгийг чагнуурын үзүүрийг дууны үүсгэвэрт холбоогүй байхад 0db байсан, хураан авсан дохионы давтамжийн спектрт 3kHz ээс өндөр давтамжид далайц нь харьцангуй бага байгаа зэргээс харж болно. SPD-г ашигласан системийн алдаа 40%-аас 3.7% болтол буурсан [2], мөн SVM шинжилгээний үр дүн моторын дууг чимээгүй орчинд бичсэн буюу [1] ажлын үр дүнтэй таарсан. Хоёр дахь шинжилгээний хувьд ANN –ийн алдааны дундаж утга нь SVM –ийнхээс 2.3% аар бага байгаа боловч хамгийн ихдээ 12% болтол өссөн байхад, SVM –ийнх нь хамгийн ихдээ 10% болсон. Эндээс уг 2 аргын онцлог байдал нь харагдаж байгаа бөгөөд цаашид хэрэглээний түвшинд гэмтэл таних системийг хөгжүүлэхэд хоёр тухиромжтой. Цаашид моторын дууны их жишээ болон эксперт механикчийн оношлогооны хамт бүртгэсэн өгөгдлийг ашигласан машин сургалтын үр дүнд моторын гэмтэл тодорхойлох загвар гаргах болно.

## VI. НОМ ЗҮЙ

- [1]. Roy Francis Navea, 'Design and Implementation of an Acoustic-Based Engine Fault Diagnostic System in the Android Platform', De La Salle University – Science and Technology Complex, Binan, Laguna, Philippines, 2013
- [2]. S. N. Dandare, S. V. Dudul, "Multiple Fault Detection in typical Automobile Engines: a Soft computing approach", First B.N.C.O.E, Pusad, Second SGBAU, Mahara, India
- [3]. Hamid Ghageri, Peyman Kabiri, "Automobile Independent Fault Detection based on Acoustic Emission Using FFT", Singapore Internation NDT Conference & Exhibition, 3-4 November 2011.
- [4]. Basavaraj S. Anami, Veerappa B.Pagi, "Multi-Stage Acoustic Fault Diagnosis of Motorcycles using Wavelet Packet Energy Distribution and ANN", KLE Institute of Technology, Hubli-580030, India.
- [5]. Nasir Rajpoot, "Texture Classification Using Discriminant Wavelet Packet Subbands"8 Department of Computer Science, United Kingdom.
- [6]. Acoustics, Car Mufflers, WikiBooks, 3 December 2014

- [7]. Steven E. Boze, "Multi-band, digital audio noise filtering, US5416847 A", May 16 1995
- [8]. "Pattern Recognition and Classification", MATLAB R2013A documentation.
- [9]. "Train Support Vector Machine Classifier", MATLAB R2013A documentation.