

ANNOTATION

of thesis work for doctor of philosophy degree (PhD) by specialty 6D071800
– «Electric power»

Yussupova Assel Orazovna

UPDATE OF ROTOR ECCENTRICITY DIAGNOSTIC SYSTEM ON ELECTRIC MACHINES USING CAPACITIVE SENSORS

This thesis work offered is dedicated to update of rotor eccentricity diagnostic system on electric machines using capacitive sensors.

Actuality of the work. Rotating electric machines (EM) in electric power industry and industrial production are used for production of electric power and as electric drives. At the moment, CIS countries use about 20 million EMs. And EM practical use demonstrates that substantial part of them for a long time operates with static rotor eccentricity that exceeds the technological eccentricity.

As it is known, rotor eccentricity in EM results in air-gap irregularity, induction of additional magnetic fields in air gap and as a result it leads to deterioration of electromagnetic characteristics and growing loss of electric energy. Considerable rotor core displacement interferes with the stator core which results in its heating. Intensive stator core heating leads to intensive breakage of stator winding insulation and causes short circuit in it. In its turn, rotor core heating can lead to breakage or burn-out of rotor winding.

In such cases, stator winding of the machine needs a time-taking and expensive repair and when rotor cast winding burns out it will totally comes out of action. Besides, during repair of winding it is necessary to get rid of «rubbing» of stator core from air gap side. Otherwise, the further operation of electric machines will lead to «fire in steel» because of short-circuit in core laminated sheets. This process requires long-time and hard manual work.

Timely detection of rotor eccentricity and its value can help both to reduce electric power consumption and prevent damage of electric machine. The following scientists made a great contribution to development and update of EM rotor eccentricity diagnostic system: Geller B., Gamata V., Voldek A.I., Novozhilov A.N., Kletsel M.Ya., Manukovskiy A.V., Kryukova Ye.V., Mirzoyeva S.M., Nikiyan N.G., Veinreb K.B., Gashimov M.A., Rogachyov V.A., Surkov D.B., Tonkikh V.G., Petukhov V.N., Potapenko A.O. and many others.

However, despite of evident achievements in this field, so far devices for detection of rotor eccentricity and its value are still less popular in industry. One of the reasons is that EM winding current or winding stray magnetic field were usually used as data source. However, data parameters offered by that data sources varied because of rotor eccentricity and fluctuation of electric mains parameters during operation modes and shut-down time in rundown mode. Need in reset of it would sharply reduce diagnostic system's sensitivity to eccentricity.

On the contrary, diagnostic systems that obtain data on rotor displacement from capacitive measuring sensors (MSs) have no such disadvantages. However,

all that is known about such diagnostic systems is drawn from few sources published describing several capacitive MSs construction diagrams. So, in this context update of EM rotor eccentricity diagnostic system using capacitive MSs is an acute question.

The goal of this study is update of EM rotor eccentricity diagnostic system using capacitive MSs.

In order to achieve this goal the following tasks shall be set and fulfilled:

- to develop capacitive MSs capable of being installed on all types of AC machines;

- to develop boundary conditions and software for modelling capacitive MSs parameters based on the net method by means of which a «zonal» method for capacitive MSs modelling shall be developed depending on rotor core teeth position during rotation;

- to select a reference damage criterion for EM rotor eccentricity diagnostic system;

- to investigate all factors capable to affect the sensitivity of diagnostic system with capacitive MSs and to develop a measuring chain capable to reduce the influence of the factors mentioned;

- to develop diagrams and justify parameters of measuring chain elements as high-frequency generator, measurement bridge and bandpass filter as well as an independent source to provide these elements with power supply with stabilized direct-current voltage;

- to develop a method to diagnose rotor eccentricity and a device to complete this task where one of the electrodes of capacitive sensors is EM shaft;

- to develop a method to diagnose rotor eccentricity and a device to complete this task where one of the electrodes of capacitive sensors is metallic foil on stator core coil brace and the other one is rotor core surface.

The object of the study is EM rotor eccentricity diagnostics with the view of updating EM rotor eccentricity diagnostic system using capacitive sensors.

The subject of the study is update of EM rotor eccentricity diagnostic system by means of using capacitive sensors.

The main tools to obtain study materials are:

- fundamentals of EM design theory;

- fundamentals of EM status diagnostics theory;

- theoretical basics of electric engineering;

- programming, physical modelling and full-scale experiment.

The scientific novelty is defined by:

1. By comparison of advantages and disadvantages of the already known technical solutions that allow determination of rotor eccentricity the reasons that reduce its sensitivity were studied.

2. Based on the net method a new capacitive MSs modelling method was proposed with arbitrary shape of electrodes as well as a software to complete this task.

3. A «zonal» method was developed for modelling capacitive MSs as a function of both rotor eccentricity value and its teeth position as well as poles with the reference to MSs during rotation.

4. It is proposed to use capacitive MSs components as the reference criterion of rotor eccentricity. The component values for analysis as a function of rotor eccentricity and its teeth and poles positions with the reference to MSs are determined by expansion of the capacitance into Fourier series.

5. A new diagnostic system measuring chain was developed which consists of measurement bridge and two-stage bandpass filter with passing frequency equal to vibration frequency of the power source in form of high-frequency generator.

6. Based on the microprocessor quartz generator a high-frequency vibration source was developed with frequency rate of 100-120 kHz. It has fixed frequency f_r and output voltage amplitude U_r and two-stage bandpass filter on gyrators capable to provide output voltage stability within working temperature range of the machine.

7. An independent source with stabilized direct-current voltage was developed to provide the diagnostic system elements with power supply, as well as methods for calculation of current and voltage transformer parameters providing this source with power supply from electric mains.

8. A new rotor eccentricity diagnostic method was developed as well as the method for determination of tripping thresholds of the rotor eccentricity detection device. Here, one of the MSs electrodes is rotor shaft and passing frequency f_0 of the measuring chain bandpass filter is equal to high-frequency generator rate f_r .

9. Capacitive MSs on stator coil brace were studied with the reference to rotor eccentricity value and it was found out that in asynchronous and synchronous machines with nonsalient pole rotor the capacitive MSs constant component shall be used as the reference damage criterion. At the same time, in salient pole rotor synchronous machine for this purpose both the capacitive MSs constant component and the first harmonic component can be used; in this respect the use of the second one is more preferable.

10. A new method for diagnosing rotor eccentricity of electric machines was developed as well as method for determination of tripping thresholds where one of MSs electrodes is the surface of rotor core or its poles. Herewith, pass frequency f_0 of measuring chain bandpass filter can be equal to carrier frequency f_r or side frequencies $f_r \pm f_c$, in this respect, use of the last one to diagnose machines with salient pole rotor is more preferable.

The practical effect of the work consists of the following:

1. It was proved that the most perspective technical solutions for detection of EM rotor eccentricity are the ones that use capacitive MSs as MSs. It means that diagnostics results do not depend on fluctuation of electrical mains parameters and load as well as on EM shut-down time when diagnosing the machine in run down mode.

2. The method developed based on the net method and software for modelling capacitive MSs with arbitrary electrode shapes gives the opportunity to calculate it with the accuracy of 4.5%. This can allow its use for controlling the accuracy of «zonal» method developed for modelling capacitive MSs parameters.

3. The «zonal» method developed with calculation accuracy of 13% allows modelling capacitive MSs as a function of rotor eccentricity value and rotor core teeth and poles positions with the reference to MSs during rotation.

4. Use of Fourier method for determination of capacitive MSs components can help to find out ones with maximum values and the components that heavily depend on rotor eccentricity and when used as the reference damage criterion.

5. A measuring chain developed based on measurement bridge and two-stage bandpass filter is capable to provide a reliable protection for diagnostic system against external electric and magnetic fields when these elements are located inside the EM.

6. High-frequency vibration source developed based on the microprocessor quartz generator and its software can help to provide frequency instability f_r within $\pm(0,1-0,5) \cdot 10^{-6}$ Hz and output voltage amplitude U_r within $\pm 2-5\%$ when ambient air temperature changes from -30 to $+80$ degrees.

7. Two-stage bandpass filter developed on gyrators can provide amplitude variation of output voltage equal to 2-2.5% within the frequency range of 114-127 kHz and when ambient air temperature varies from -30 to $+80$ degrees.

8. The independent power source developed can help to provide all diagnostic system elements with stabilized voltage of 12V with current consumption of up to 0.2A.

9. The methods developed for calculation of current and voltage transformer parameters providing it with electric power from EM electric mains gives the opportunity to calculate them for a wide range of output voltage and current parameters.

10. In the rotor diagnostic system developed where one of the electrodes is rotor shaft the capacitive MSs are located inside the EM and other elements of the diagnostic system in a single block are located on its external surface. Such construction can help to avoid long connector wires and easily provide a reliable protection for the system elements against electric and magnetic fields, as well as more «light» temperature mode during operation, easy control of correct operation of the device and its adjustment without machine disassembling.

11. In rotor eccentricity diagnostic system developed the capacitive MSs (where one of electrodes is a metallic foil on stator coil brace and the other is rotor core surface or pole surface) and measuring chain are located on MSs coil brace, and other elements of the diagnostic system in a single block are located on EM external surface. This makes MSs construction and installation more easy.

Approbation of the study results. Main statements of the thesis were reported and discussed at the 17-th International conference entitled " Satpayev readings " (Pavlodar) in April, 2017, at the 9-th International conference entitled " Toraigyrov readings " (Pavlodar) in November, 2017; at the VIII-th International

scientific and technical conference entitled "Technical sciences: problems and solutions" (Moscow) in February, 2018.

Publications. Regarding to this document 11 works were published including 3 works in the magazines recommended by VAK RK, two articles in «Vestnik OmGTU» (Russia) magazine and 3 patents of invention were submitted: 2 of them in RoK, 1 in Russian Federation. Also, two articles were accepted for publication: «Elektrotehnika» (Moscow, Russia) magazine, 2019 and «Przegląd Elektrotechniczny» (Poland) magazine, 2018 entering the Scopus citation base.

Structure and volume of the thesis. The thesis consists of introduction, 3 chapters, conclusion and 2 attachments. It comprises 101 pages, has 61 figures and 4 tables. The reference list used includes 80 names.

The first chapter describes EM constructional features and types of eccentricity. Analysis of the constructional features of rotating EMs demonstrated that the main cause of rotor eccentricity laid in constructional elements securing rotor position with the reference to stator where the main reason of rotor eccentricity was shaft displacement. Process equipment used nowadays and human factor lead to the fact that EM production plants produce items with the eccentricity of up to 0.1-0.12. Moreover, rotor eccentricity features were described with air-gap irregularity, induction of additional magnetic fields in it, deterioration of EM electromagnetic characteristics and rise of electric energy loss for about 0.45-3.95%. The analysis of the already known methods for detection of rotor eccentricity on EMs that come out of action or EMs that are still in operation demonstrated that the most perspective way is application of a method where capacitive MSs is used to obtain the damage criterion. In this respect, EM diagnostics results do not depend on variation of electric mains parameters, load jumps and EM parameters changes as well as its operation mode. MSs capacitance used in EM rotor eccentricity diagnostic system depends both on rotor eccentricity and rotor core surface shape. Therefore, the already known capacitance modelling methods do not allow modelling parameters of such MSs during rotor rotation.

In the second chapter a capacitive MSs modelling method was developed for rotor eccentricity diagnostic system which is based on the net method. This method with the accuracy of up to 4.5% can help to perform modelling with arbitrary electrode shape. The «zonal» method offered for modelling capacitive MSs for rotor eccentricity diagnostic system allows its easy modelling as a function of rotor teeth positions during its rotation with calculation accuracy of up to 13%. The reference criterion of rotor eccentricity was found out which can be determined through analysis of MSs harmonic capacitance range depending on rotor eccentricity value. In asynchronous machines where one of the electrodes of capacitive MSs of the diagnostic system is rotor shaft surface or rotor surface with closed or open slots; the constant component shall be used as the reference damage criterion in the diagnostic system. In synchronous machines where one of the electrodes of capacitive MSs of the diagnostic system is salient pole rotor surface its constant component or the first harmonic components of its capacitance shall be used as the reference damage criterion. In synchronous machines where one of the electrodes of capacitive MSs of the diagnostic system is nonsalient pole rotor

surface its constant component shall be used as the reference damage criterion since the first harmonic component value is much more less.

It was found out that the measuring chain in form of a measuring bridge with band-pass filter where the bridge is powered by the high-frequency generator satisfies in the best way possible the requirements of the EM rotor eccentricity diagnostic system with MSs where one of the electrodes is grounded.

In the third chapter at Pavlodar state university named after Toraigyrov («Electric power» department) jointly with Manukovskiy A.V. (PhD in Technical Sciences) the design of the quartz generator and its software was finished off for the measuring chain of the diagnostic system updated; this can provide sufficient stability for frequency and amplitude as well as permissible level of harmonics of the signal generated within the required temperature range. It was found out that the two-stage filter on gyrators is capable to provide a pass band of 5 kHz with gain bandwidth of $Q=60$ dB within working temperatures ranging from -30 to $+80$ degrees which is quite sufficient for diagnostic system. An analysis is made based on which an independent source with stabilized direct current was selected capable to provide power supply for the high-frequency generator and the two-stage filter of the system diagnosing the low-voltage and high-voltage electric machines with the help of small size and cheap voltage transformers as well as standard T3PJ split-type and through-type current transformers.

The rotor eccentricity diagnostic system with MSs was updated where one of electrodes is EM shaft. This system can control both the shaft displacement and direction of the displacement. In addition, all elements are located on EM external surface that enables to create a shielding to protect from external electric and electromagnetic fields and provide an access to control the functionality of the device and set up tripping limits.

The rotor eccentricity diagnostic system was updated where one of MSs foil-type electrodes is located in coil braces. This can help to control both the shaft displacement and direction of displacement. In addition, measurement bridge and bandpass filter are located on protruding part of the coil brace and other elements are located on EM external surface. Thus, it makes MSs manufacture and installation more easy.

АНДАТПА

6D071800 – «Электрэнергетика» мамандығы бойынша
философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін диссертация

Юсупова Асель Оразовна

СЫЙЫМДЫЛЫҚТЫ ӨЛШЕУ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕРІНДЕ ЭЛЕКТРЛІК МАШИНАЛАР РОТОРЫНЫҢ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТІН ДИАГНОСТИКАЛАУ ЖҮЙЕЛЕРІН ЖЕТІЛДІРУ

Ұсынылған диссертациялық жұмыс сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштерінде электрлік машиналар роторының эксцентриситетін диагностикалау жүйелерін жетілдіру тақырыбына арналған.

Жұмыстың өзектілігі. Электр энергетикада және өндірістегі айналатын электрлік машиналар (ЭМ) электр қуатын жасау үшін және электр жетек ретінде пайдаланылады. Қазіргі уақытта ТМД елдерінде 20 миллионға жуық ЭМ қолданылуда. Және оларды пайдалану тәжірибесі көрсеткендей, олардың көп бөлігі ұзақ уақыт бойы технологиялық эксцентриситетінен жоғары ротордың статикалық эксцентриситетімен жұмыс жасайды.

Белгілі болғандай, ротордың ЭМ-дегі эксцентриситеті ауа саңылауының біркелкі емес болуы, ауа саңылауындағы қосымша магнит өрісінің пайда болуы және электромеханикалық сипаттамалардың нашарлауы және электр энергиясының қосымша шығындарымен қатар жүреді. Ротордың білігінің едәуір жылжуы кезінде оны статордың білігіне бекітеді. Бұл кезде олардың жылуы орын алады. Статор білегінің қатты қызуы статор орамасының және қысқа тұйықталудың оқшаулануын тездетеді. Өз кезегінде, ротордың білегінің қызуы ротордың орамасының бұзылуына немесе балқуына әкелуі мүмкін.

Мұндай жағдайларда машина статор орамаларының ұзақ және қымбат жөндеуін қажет етеді, ал ротордың құйылған орамасының еруі кезінде ол толығымен істен шығады. Сонымен қатар, орамаларды жөндеу кезінде, ауа саңылауының жағынан статордың білегін «ысқылану» күйін жою қажет. Әйтпесе, электр машиналарын одан әрі пайдалану оның беттерінің жабылуына байланысты білектегі «болаттан жасалған отқа» әкеледі. Бұл операция ұзақ және көп еңбекті талап етеді.

Ротордың эксцентриситетінің бар болуын және шамасын дер кезінде анықтау энергияны тұтынуды азайтуға ғана емес, сонымен қатар электр машинасының зақымдануына жол бермейді. ЭМ эксцентриситетінің диагностикалау жүйелерін дайындауға және жетілдіруге үлкен үлес қосқан ғалымдар - Геллер Б., Гамата В., Вольдек А.И., Новожилов А.Н., Клецель М.Я., Мануковский А.В., Крюкова Е.В., Мирзоева С.М., Никиян Н.Г., Вейнреб К.Б., Гашимов М.А., Рогачев В.А., Сурков Д.Б., Тонких В.Г., Петухов В.Н., Потапенко А.О. және т.б.

Дегенмен, осы саладағы күмәнсіз жетістіктерге қарамастан, ротордың эксцентриситетінің бар-жоғын анықтауға арналған құрылғы әлі де өндірісте

кеңінен қолданылмайды. Мұның бір себебі, көбінесе ЭМ орамаларында ток қолданылуы немесе осы орамалардың магниттік өрісін тарқату ақпарат көзі ретінде қолданды. Алайда, осы ақпарат көздерінен алынған ақпарат параметрлері ротордың эксцентриситетінен ғана емес, сондай-ақ жұмыс режимдеріндегі электр желісінің параметрлері мен шығару режимінде өшіру уақытының ауытқуынан да ауысады. Осыдан бас тарту қажеттілігі диагностикалық жүйелердің эксцентриситетке сезімталдығының күрт төмендеуіне әкеледі.

Бұл кемшіліктер ротордың сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштерінен (ӨТ) қозғалысы туралы ақпаратты алатын диагностикалық жүйеден айырады. Дегенмен, осындай диагностикалық жүйелер туралы білетіміз ӨТ бірнеше құрылымдық сызбаларын жариялауға келеді. Осыған байланысты, сыйымды ӨТ арналған ЭМ роторының эксцентриситеті үшін диагностикалық жүйелерді жетілдіру маңызды болып табылады.

Жұмыстың мақсаты – сыйымды ӨТ арналған ЭМ ротордың эксцентриситетнің диагностикалық жүйесін жетілдіру.

Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылып, шешілді:

- ауыспалы ток машиналарының барлық түрлеріне орнатуға жарамды сыйымдылықты ӨТ әзірлеу;

- роторлық білік тістерінің ротордың айналу жағдайына байланысты сыйымды ӨТ үлгілеуге арналған «аймақ» әдісін негіздейтін және әзірлейтін тор әдісіне сәйкес сыйымды ӨТ параметрлерін модельдеу үшін шекаралық шарттар мен бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеу;

- ЭМ роторының эксцентриситетінің диагностикалық жүйесі үшін зақымданудың ақпараттық белгіні таңдауды жүзеге асыру;

- сыйымдылықты ӨТ диагностикалық жүйенің сезімталдығын шектеуі мүмкін барлық факторларды зерттеу және осы факторлардың әсерін азайтуға қабілетті өлшеу тізбегін жасау;

- жоғары жиілікті генератор, өлшеу көпірі және жолақты өткізгіштік сүзгі түрінде өлшеу тізбегінің элементтерінің сызбаларын әзірлеу және параметрлерін негіздеу, сондай-ақ осы элементтерді тұрақтандырылған тұрақты кернеумен қамтамасыз ету үшін тәуелсіз көзді дайындау;

- ротордың эксцентриситетін және оны іске асыру үшін құрылғыны диагностикалау әдісін әзірлеу, онда сыйымдылықты ӨТ электродтарының бірі - ЭМ білігі;

- ротордың эксцентриситетін және оны іске асыру үшін құрылғыны диагностикалау әдісін әзірлеу, онда сыйымдылықты ӨТ электродтарының бірі - статордың білігінің саңылаулы сынасындағы металл фольга және басқасында - ротордың білігінің беті.

Зерттеудің нысаны – сыйымдылықты ӨТ үшін ЭМ роторының эксцентриситетін диагностикалау жүйесін жетілдіруге арналған ЭМ роторы эксцентриситетін диагностикалау саласы.

Зерттеудің тақырыбы – сыйымдылықты ӨТ үшін пайдалану жолымен электр станциясы машиналарының ЭМ роторларының эксцентриситетін диагностикалау жүйесін жетілдіру.

Зерттеу материалдарын алу құралдары:

- ЭМ конструкциялауды теориясының негізгі ережелері;
- ЭМ күйін диагностикалауды теориясының негізгі ережелері;
- электротехниканың теориялық негіздері;
- бағдарламалау, физикалық модельдеу және табиғи эксперимент әдісі.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы анықталады:

1. Ротордың эксцентриситетін анықтауға мүмкіндік беретін белгілі техникалық шешімдердің артықшылығы мен кемшіліктерін салыстыра отырып, олардың сезімталдығын шектейтін себептер зерттелді.

2. Торлар әдіс негізінде ӨТ сыйымдылығын электродтардың ерікті нысаны мен оны іске асыру үшін бағдарламалық қамтамасыз етуді модельдеуге арналған жаңа әдіс ұсынылды.

3. ӨТ-нің сыйымдылығын тәуелділіктерді ротордың эксцентритеті шамасына ғана емес, сонымен қатар айналу кезінде ӨТ - ге қатысты тістер мен полюстердің орнын модельдеу үшін «аймақ» әдісі жасалды.

4. ӨТ сыйымдылық құрамдастырын ротордың эксцентритетінің ақпараттық белгісі ретінде пайдалану ұсынылады, оның шамасы ротордың эксцентритетінің мөлшерінен тәуелділігін талдау үшін және ӨТ-ге қатысты тістер немесе полюстердің орналасуы Фурье қатарына ыдырату жолымен анықталады.

5. Өлшеу көпірінен және жоғары жиілікті генератор түріндегі қуат берудің тербелу жиілігіне тең беру жиілігімен сызықты – жіберу екі сатылы сүзгіден тұратын диагностикалық жүйенің жаңа өлшеу тізбесі әзірленді.

6. Микропроцессорлық кварцты генератордың негізінде 100-120 кГц жиіліктегі жоғары жиілікті тербелістердің көзі әзірленді, оның тұрақты жиілігі f_r мен шығыс кернеуінің амплитудасы U_r , сондай-ақ машинаның жұмыс температурасының диапазонында кернеудің тұрақтылығын қамтамасыз етуге қабілетті генераторлардағы екі сатылы таспалы – өткізгіш сүзгісі бар.

7. Диагностика жүйесінің элементтерін қуаттандыру үшін тұрақты ток кернеуінің дербес көзі, сондай-ақ осы көзді электр желісінен электрмен қамтамасыз ететін ток және кернеу трансформаторларының параметрлерін есептеу әдістері әзірленді.

8. Ротордың эксцентриситетін диагностикалаудың жаңа әдісі және осы әдісті іске асыру үшін құрылғының жұмыс істеу шектерін анықтау әдісі әзірленді, сыйымдылықты ӨТ электродтарының бірі - ротордың білікшесі, ал және өлшеу тізбегінің жолақты - өткізгіш сүзгісін жіберу f_0 жиілігі жоғары жиілікті генератордың жиілігіне f_r тең деп есептеледі.

9. ӨТ сыйымдылығының ротордың эксцентриситетің шамасы бойынша статордың саңылаулы жүзіне тәуелділіктері зерттелді және анықталмаған полюстік роторы бар асинхронды және синхронды машиналарда ӨТ сыйымдылығының тұрақты компоненті бұзылудың ақпараттық белгісі ретінде пайдаланылуы тиіс екендігі анықталды. Бұл жағдайда анық полюсті синхронды машинада ӨТ сыйымдылығының тұрақты құрамдас бөлігін және

оның алғашқы гармоникалығын қолдануға болады, сондай - ақ бірінші гармоникалықты пайдаланған жөн.

10. Электр машинасының роторының эксцентриситетін диагностикалау үшін жаңа әдіс және бұл әдісті іске асыру үшін құрылғының жұмыс істеу шектерін анықтау әдісі әзірленді, оның сыйымдылықты ӨТ электродтарының бірі ротордың білігінің немесе оның полюстерінің беті болып табылады. Бұл жағдайда өлшеу тізбегінің жолақты-өткізгіш сүзгісінің f_0 жіберу жиілігі негізгі жиілігі f_r мен бүйірлік жиіліктерге $f_r \pm f_c$ де тең болуы мүмкін, анық полюсті роторлы диагностикалық машиналарға соңғы нұсқаны қолдану тиімдірек болып табылады.

Жұмыстың практикалық құндылығы:

1. ЭМ роторының эксцентриситетін анықтау үшін ең тиімді жол техникалық шешімдер болып табылады, оларда ӨТ ретінде сыйымдылықты ӨТ пайдаланылады. Осыған байланысты, диагностиканың нәтижелері электрмен жабдықтау желісінің параметрлері мен жүктемелердің ауытқуына, сондай-ақ, шығару режимінде машинаны диагностикалау кезінде ЭМ-ді өшіруге тәуелді емес.

2. Электродтардың торлар әдісіне негізделген ерікті формасымен ӨТ сыйымдылығын модельдеу әдісі мен бағдарламалық қамтамасыз ету 4,5% қателікпен есептеуге мүмкіндік береді. Бұл сыйымдылықты ӨТ параметрлерін модельдеу үшін «аймақ» әдісінің дәлдігін бақылауға мүмкіндік береді.

3. Әзірленген «аймақ» әдісі ротордың эксцентриситетінің шамасы бойынша, сондай-ақ айналдыру процесінде ҚТ-ге қатысты тістер мен полюстердің орнына байланысты ӨТ сыйымдылығының тәуелділіктерін модельдеу үшін 13% қателікпен тәртібін есептеуге мүмкіндік береді.

4. ӨТ сыйымдылық құрамдастарын анықтау үшін Фурье әдісін пайдалану ең үлкен шамаға ие және бұзылудың ақпараттық белгісі ретінде пайдалану үшін ротордың эксцентриситетінен тәуелді өзгеретіндігін анықтауға мүмкіндік береді.

5. Өлшеу көпірі мен жолақты - өткізгіш екі сатылы сүзгінің негізінде әзірленген өлшеу тізбегі бұл элементтерді ЭМ орналастырылған кезде сыртқы электр және магнит өрісінің әсерінен диагностикалау жүйесін жеткілікті сенімді қорғауды қамтамасыз ете алады.

6. Микропроцессорлық кварц генераторының негізінде әзірленген жоғары жиілікті тербелістердің көзі және оның бағдарламалық қамтамасыз етуі қоршаған ортаны температурасы -30-дан +80 градусқа дейін өзгерген кезде жиілік тұрақсыздығын $f_r \pm (0,1 - 0,5) \cdot 10^{-6}$ Гц және кернеу амплитудасын U_r шығуда $\pm 2-5\%$ аралығында қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

7. Әзірленген гираторлардағы екі сатылы жолақты - өткізгіш сүзгі қоршаған ортаның температурасы -30-дан +80 градус аралығында болған жағдайда 114-127 кГц жиілікте шығу кернеуінің амплитудасының өзгеруін 2-2,5% ауытқуымен қамтамасыз ете алады.

8. Әзірленген дербес қуат көзі диагностикалық жүйенің барлық элементтерін тұтынылатын ток бойынша 0,2А дейін болған жағдай 12 В тұрақтандырылған кернеумен қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

9. ЭМ қуат беру желісінен электрмен қамтамасыз ететін ток және кернеу трансформаторларының параметрлерін есептеудің әзірленген әдістері олардың шығу кернеуінің және токтарының кең ауқымын есептеу мүмкіндігін береді.

10. Электродтардың бірі ротордың білікшесі болып табылатын сыйымды ӨТ роторының эксцентриситетін диагностикалау үшін әзірленген құрылғыда ол ЭМ ішінде, ал диагностикалық жүйенің барлық басқа элементтеріне сыртқы бетінде бірыңғай блок ретінде орналастырылады. Бұл жағдайда ұзын қосылым сымдары қажет емес және жүйенің элементтері электр, магнит өрісінің әсерінен, жұмыс режимінің «жеңіл» температурасынан, құрылғының дұрыстығын бақылайтын және осы құрылғыны бөлшектеместен реттеу мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

11. Электродтардың бірі статордың саңылау жүзіндегі метал фольгасы, ал басқалары үшін ротордың білегі немесе полюстерінің басқа беті болып табылатын сыйымды ӨТ роторының эксцентриситетін диагностикалау үшін әзірленген құрылғыда, өлшеу тізбегі ӨТ саңылаулы жүзінде, ал диагностикалық жүйенің барлық басқа элементтеріне бірыңғай блок ретінде сыртынан орналастырылады. Бұл ӨТ конструкциясын және орнатылуын айтарлықтай жеңілдетеді.

Зерттеу нәтижелерін сынау - диссертацияның негізгі ережелері 2017 жылдың сәуірінде өткен «Сәтпаев оқулары» 17-ші халықаралық конференциясында (Павлодар қ.), 2017 жылдың қараша айында «Торайғыров оқулары» 9-шы халықаралық конференциясында баяндалды және талқыланды; 2018 жылдың ақпанында «Технические науки: проблемы и решения» атты VIII Халықаралық ғылыми-техникалық конференцияда (Мәскеу қ.) таныстырылды.

Жарияланымдар. Жұмыс бойынша 11 жарияланым басылып шықты, оның ішінде ҚР ЖАК ұсынған журналдарда екі, «Вестник ОмГТУ» (Ресей) журналында екі мақала, сондай-ақ өнертабысқа 3 патент, оның 2 ҚР, 1 РФ берілген. Сондай-ақ, жариялануға екі мақала қабылданды, атап айтқанда: «Электротехника» (Мәскеу, Ресей) журналында, Scopus дәйексөз дерекқорына кіретін «Przegląd Elektrotechniczny» (Польша) журналында, 2018 ж.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертация кіріспеден, 3 бөлімнен, қорытындыдан және 2 қосымшадан тұрады. Жұмыс 101 бетте берілген, 61 сурет және 4 кестесі бар. Қолданылған әдебиеттер тізімі 80 атаудан тұрады.

Бірінші бөлімде электр машиналарының құрылымдық ерекшеліктері және эксцентриситет түрлері қарастырылған. Айналмалы ЭМ-нің құрылымдық ерекшеліктеріне талдау ротордың эксцентриситетінің негізгі себептері олардың ротордың статорға қатысты орналасуын бекітетін элементтері болып табылады, ал ротордың эксцентриситетінің пайда

болуының басты белгісі - біліктің қозғалуы. Қазіргі уақытта қолданылатын технологиялық жабдықтар мен адам факторлары ЭМ өндіруге арналған қондырғылар 0,1-0,12 мәніне жететін технологиялық эксцентриситет өнімдер шығарады. Ротордың эксцентриситетінің біркелкі емес ауа саңылауларымен бірге жүретін ерекшеліктері, онда қосымша магнит өрісінің пайда болуы, ЭМ жұмыс сипаттамаларының нашарлауы және электр энергиясының жоғалуы шамамен 0,45-3,95% жоғарылауы қарастырылған. Ротордың эксцентриситетінің жұмыстан шығарылған немесе оны пайдалану барысында анықтауға арналған танымал әдістерді өндірістік талдау жүргізілген, онда зақымдану туралы ақпарат алу үшін сыйымдылықты ӨТ пайдалану тиімді әдіс болып табылады. Осыған байланысты, ЭМ диагностикасының нәтижелері электрмен жабдықтау желісінің параметрлерінің ауытқуына, ЭМ және оның жұмыс режимдеріндегі параметрлердің өзгеруіне және жүктемесіне тәуелді емес. ЭМ пайдалану кезінде ротордың эксцентриситетін диагностикалау жүйесінде қолданылатын сыйымдылықты ӨТ тек ротордың эксцентриситеті ғана емес, сондай-ақ ротор білігінің бетінің пішініне байланысты. Сондықтан, сыйымдылықты модельдеудің белгілі әдістері ротордың айналу процесінде осындай ӨТ параметрлерін модельдеуге мүмкіндік бермейді.

Екінші бөлімде тор әдісіне негізделген ротордың эксцентриситетін диагностикалау жүйесінің ӨТ сыйымдылығын модельдеу әдісі әзірленді, ол 4,5% аспайтын қателікпен электродтардың еркін формасында модельдеуге мүмкіндік береді. Ротордың эксцентриситетін диагностикалау жүйесінің ӨТ сыйымдылығын модельдеуге ұсынылған «аймақ» әдісі оңай және айналу кезінде ротордың тістерінің орнына тәуелділігін моделдеуді 13% аспайтын қателікпен жүргізуге мүмкіндік береді. Ротордың эксцентриситетінің ақпараттық белгісі анықталды, ол ӨТ гармоникалық сыйымдылығының спектрін осы ротордың эксцентриситет шамасына талдау арқылы анықталына алады.

Сыйымдылықты ӨТ диагностика жүйесінің электродтарының біреуі роторлы біліктің немесе жабық немесе ашық ойықтары бар ротордың беті болатын асинхронды машиналарда диагностикалық жүйедегі зақымның ақпараттық белгісі ретінде оның ақпараттық құрамдасын пайдаланылуы керек. Сыйымдылықты ӨТ диагностикалық жүйесінің электродтарының біреуі айқын полюсті ротордың беті болып табылатын синхронды машиналарда оның тұрақты құрамдасы ретінде де, оның сыйымдылығының алғашқы гармоникалық құрамдасы да зиянды ақпараттық белгі ретінде пайдаланылуы мүмкін. Сыйымдылықты ӨТ диагностикалық жүйесінің электродтарының бірі анық емес полюстік ротордың беті болып табылатын синхронды машиналарда, оның тұрақты құрамдас бөлігі зақымданудың ақпараттық белгісі ретінде таңдалуы керек, өйткені бірінші гармоника құрамдасының шамасы айтарлықтай кем.

Электродтардың бірі жерге тұйықталған ӨТ бар ЭМ роторының эксцентриситетін диагностикалау жүйесінің ең көп талап етілетін өлшемі -

жоғары генератормен қоректендірілетін жолақты – өткізгіш сүзгі түріндегі өлшеу көпірі екендігі анықталды.

Үшінші тарауда жетілдірілетін диагностикалық жүйенің өлшеу тізбегі үшін С.Торайғыров атындағы Павлодар мемлекеттік университетінің «Электрэнергетика» кафедрасында т.ғ.к. А.В., Мануковскиймен бірге кварц генераторы және оның бағдарламалық қамтамасыз етілуін әзірлеу жұмыстары жалғастырылды, олар жиілік пен амплитуданың жеткілікті дәрежесін, сондай – ақ қажетті температуралар диапазонында жасалатын сигналдың гармоник деңгейін қамтамасыз ете алады. Гираторлардағы екі сатылы сүзгі 5 кГц жолақты өткізу қабілетін қамтамасыз ете алатындығы анықталды, бұл диагностикалық жүйені енгізу үшін жеткілікті болып табылатын -30-дан +80 градусқа дейінгі жұмыс температурасының диапазонында жүзеге асырылады. Талдау жүргізілді, оның тұрақты токтың тұрақтандырылатын дербес көзі таңдалды, ол төмен вольтты және жоғары вольтты электрлік машиналардың диагностикалау жүйелерінің екі сатылы сүзгісінің және жоғары жиілікті генератордың қоректендірілуін қамтамасыз ете алады, төмен габаритті және арзан кернеу трансформаторларының көмегімен, сондай – ақ сериялармен шығарылатын ажыратқыш, ТЗРЛ типті өткізу ток трансформаторларының көмегімен.

Сыйымдылықты ӨТ бар ротордың эксцентриситетін диагностикалау жүйесі жетілдірілді, оның электродтардың бірі - ЭМ білігі біліктің қозғалысын ғана емес, сондай-ақ қозғалыстың бағытын да бақылай алады. Сонымен бірге, оның барлық элементтері ЭМ-ның сыртқы бетінде орналасқан, сондықтан оларды сыртқы электр және электромагниттік өрістерден қорғауға және құрылғының өнімділігін бақылап, іске қосу шегін орнату жеткілікті.

Ротордың эксцентриситетті диагностикалық жүйесі жетілдірілді, оның электродтарының бірі - фольга түрінде саңылау жүзінде орналастырылады, сонымен қатар біліктің қозғалысын ғана емес, сондай-ақ қозғалыс бағытын да бақылайды. Бұл жағдайда өлшеу көпірі мен жолақты - өткізгіш сүзгісі саңылау жүзінің шығып тұрған бөлігіне, ал қалған элементтері ЭМ-нің сыртқы бетіне орналастырылады. Осыған орай, ӨТ дайындау мен орнату айтарлықтай оңайлатылды.

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии(PhD) по специальности 6D071800 – «Электроэнергетика»

Юсупова Асель Оразовна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ЕМКОСТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Предложенная диссертационная работа посвящена совершенствованию системы диагностики эксцентриситета ротора электрических машин на емкостных измерительных преобразователях

Актуальность работы. Вращающиеся электрические машины (ЭМ) в электроэнергетике и промышленном производстве используются для производства электроэнергии и в качестве электропривода. В настоящее время в странах СНГ находится в эксплуатации порядка 20 миллионов ЭМ. И, как показывает практика их эксплуатации, значительная часть из них длительное время работают со статическим эксцентриситетом ротора, превышающим их технологический эксцентриситет.

Как известно эксцентриситет ротора в ЭМ сопровождается неравномерностью воздушного зазора, возникновением в воздушном зазоре дополнительных магнитных полей и как следствие ухудшением электромеханических характеристик и ростом дополнительных потерь электроэнергии. При значительном смещении сердечник ротора зацепляет за сердечник статора. Что сопровождается их разогревом. Сильный разогрев сердечника статора приводит к ускоренному разрушению изоляции обмотки статора и короткому замыканию в ней. В свою очередь разогрев сердечника ротора может привести к разрушению или выплавлению обмотки ротора.

В таких случаях машина требует длительного и дорогостоящего ремонта обмоток статора, а при выплавлении литой обмотки ротора он полностью выходит из строя. Кроме того, во время ремонта обмоток требуется осуществить устранение «затира» сердечника статора со стороны воздушного зазора. Иначе дальнейшая эксплуатация электрических машин приведет к «пожару в стали» сердечника из-за замыкания его листов. Эта операция требует длительного и кропотливого ручного труда.

Своевременное выявление наличия и величины эксцентриситета ротора позволит не только сократить расход потребления электроэнергии, но и предотвратить повреждение электрической машины. Большой вклад в разработку и совершенствование систем диагностики эксцентриситета ротора ЭМ внесли такие ученые как Геллер Б., Гамата В., Вольдек А.И., Новожилов А.Н., Клецель М.Я., Мануковский А.В., Крюкова Е.В., Мирзоева С.М., Никян Н.Г., Вейнреб К.Б., Гашимов М.А., Рогачев В.А., Сурков Д.Б., Тонких В.Г., Петухов В.Н., Потапенко А.О. и целый ряд других.

Однако, несмотря на несомненные достижения в этой области устройства по выявлению наличия и величины эксцентриситета ротора до сих пор на производстве они широкого распространения не получили. Одной из причин этого является то, что в качестве источника информации в них обычно использовался ток в обмотках ЭМ или магнитное поле рассеяния этих обмоток. Однако параметры информации с этих источников информации меняются не только от эксцентриситета ротора, но и от колебаний параметров электрической сети в эксплуатационных режимах работы и от времени отключения в режиме выбега. Необходимость отстройки от этого приводит к тому, что чувствительность систем диагностики к эксцентриситету резко снижается.

Этих недостатков лишены системы диагностики, которые получают информацию о перемещении ротора от емкостных измерительных преобразователей (ИП). Однако, все что известно о таких системах диагностики сводится к публикации нескольких конструктивных схем ИП. В связи с этим совершенствование систем диагностики эксцентриситета ротора ЭМ на емкостных ИП является актуальным.

Целью работы является совершенствование системы диагностики эксцентриситета ротора ЭМ на емкостных ИП.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработать емкостные ИП пригодные для установки на все типы машин переменного тока;

- разработать граничные условия и программное обеспечение для моделирования параметров емкостных ИП по методу сеток, с помощью которого в свою очередь производится обоснование и разработка «зонного» метода моделирования емкости ИП в зависимости от положения зубцов сердечника ротора при его вращении;

- осуществить выбор информационного признака повреждения для системы диагностики эксцентриситета ротора ЭМ;

- исследовать все факторы, которые способны ограничить чувствительность системы диагностики с емкостным ИП, и разработать измерительную цепь способную снизить влияние этих факторов;

- разработать схемы и обосновать параметры элементов измерительной цепи в виде генератора высокой частоты, измерительного моста и полосно-пропускающего фильтра, а также автономного источника для питания этих элементов стабилизированным постоянным напряжением;

- разработать способ диагностики эксцентриситета ротора и устройство для его реализации, в котором одним из электродов емкостного ИП является вал ЭМ;

- разработать способ диагностики эксцентриситета ротора и устройство для его реализации, в котором одним из электродов емкостного ИП является металлическая фольга на пазовом клине сердечника статора, а другим поверхность сердечника ротора.

Объектом исследования является область диагностирования эксцентриситета ротора ЭМ посвященная совершенствованию систем диагностики эксцентриситета ротора ЭМ на емкостных ИП.

Предмет исследования – совершенствование систем диагностики эксцентриситета ротора ЭМ машин электрической станции путем использования для этого емкостных ИП.

Инструментом в получении материалов исследования являются:

- фундаментальные положения теории конструирования ЭМ;
- фундаментальные положения теории диагностики состояния ЭМ;
- теоретические основы электротехники;
- программирование, физическое моделирование и метод натурального эксперимента.

Научная новизна работы определяется тем, что:

1. Путем сопоставления достоинств и недостатков известных технических решений, позволяющих выявлять эксцентриситет ротора, исследованы причины, которые ограничивают их чувствительность.

2. На основе метода сеток предложен новый способ моделирования емкости ИП с произвольной формой электродов и программное обеспечение для его реализации.

3. Разработан «зонный» способ моделирования зависимостей емкости ИП не только от величины эксцентриситета ротора, но от положения его зубцов и полюсов относительно ИП в процессе вращения.

4. Предложено в качестве информационного признака эксцентриситета ротора использовать составляющие емкости ИП, величины которых для анализа их зависимости от величины эксцентриситета ротора и положения его зубцов или полюсов относительно ИП определяются путем разложения этой емкости в ряд Фурье.

5. Разработана новая измерительная цепь системы диагностики, состоящая из измерительного моста и полосно-пропускающего двухступенчатого фильтра с частотой пропускания равной частоте колебаний источника питания в виде высокочастотного генератора.

6. На базе микропроцессорного кварцевого генератора разработан источник высокочастотных колебаний с частотой 100-120кГц имеющий стабильную частоту f_r и амплитуду выходного напряжения U_r , а также полосно-пропускающий двухступенчатый фильтр на гираторах, способный обеспечить стабильность напряжения на его выходе в диапазоне рабочих температур машины.

7. Разработан автономный источник стабилизированного постоянного напряжения для питания элементов системы диагностики, а также методы расчета параметров трансформаторов тока и напряжения, обеспечивающих этот источник электроэнергией от сети питания.

8. Разработан новый способ диагностики эксцентриситета ротора и методика определения порогов срабатывания устройства для реализации этого способа, одним из электродов у емкостного ИП которого является вал

ротора, а частота пропускания f_0 полосно-пропускающего фильтра измерительной цепи принимается равной частоте f_r высокочастотного генератора.

9. Исследованы зависимости емкости ИП на пазовом клине статора от величины эксцентриситета ротора и выявлено, что в асинхронных и синхронных машинах с неявнополюсным ротором в качестве информационного признака повреждения следует использовать постоянную составляющую емкости ИП. При этом в явнополюсной синхронной машине для этих целей можно использовать как постоянную составляющую емкости ИП, так и ее первую гармоническую, причем использование первой гармонической предпочтительнее.

10. Разработан новый способ диагностики эксцентриситета ротора электрической машины и методика определения порогов срабатывания устройства для реализации этого способа, одним из электродов емкостного ИП которого является поверхность сердечника ротора или его полюсов. При этом частота пропускания f_0 полосно-пропускающего фильтра измерительной цепи может приниматься равной как несущей частоте f_r , так и боковым частотам $f_r \pm f_c$, причем для диагностирования машин с явнополюсным ротором использование последнего варианта предпочтительней.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

1. Выявлено, что наиболее перспективными для выявления эксцентриситета ротора ЭМ являются технические решения, в которых в качестве ИП используются емкостные ИП. В связи с чем, результаты диагностики не зависят от колебаний параметров питающей сети и нагрузки, а также от времени отключения ЭМ при диагностировании машины в режиме выбега.

2. Разработанный, на основе методе сеток, метод и программное обеспечение для моделирования емкости ИП с произвольной формой электродов дает возможность рассчитывать ее с погрешностью порядка 4,5%. Что позволяет использовать его для контроля точности разработанного «зонного» метода моделирования параметров емкостного ИП.

3. Разработанный «зонный» метод позволяет с погрешностью расчета порядка 13% моделировать зависимости емкости ИП как от величины эксцентриситета ротора, так и от положения его зубцов и полюсов относительно ИП в процессе вращения.

4. Использование для выявления составляющих емкости ИП метода Фурье позволяет выявить те из них, которые имеют наибольшую величину и в наибольшей степени изменяются в зависимости от эксцентриситета ротора для использования их в качестве информационного признака повреждения.

5. Разработанная на базе измерительного моста и полосно-пропускающего двухступенчатого фильтра измерительная цепь способна обеспечить достаточно надежную защиту системы диагностики от

воздействия внешних электрических и магнитных полей при размещении этих элементов внутри ЭМ.

6. Разработанный на базе микропроцессорного кварцевого генератора источник высокочастотных колебаний и его программное обеспечение позволяют обеспечить нестабильность частоты f_r в пределах $\pm(0,1 - 0,5) \cdot 10^{-6}$ Гц и амплитуды напряжения U_r на его выходе в пределах $\pm 2-5\%$ при изменении температуры окружающей среды от -30 до $+80$ градусов.

7. Разработанный полосно-пропускающий двухступенчатый фильтр на гираторах способен в диапазоне частот 114-127кГц обеспечить колебание амплитуды выходного напряжения в 2-2,5% при колебании температуры окружающей среды в пределах -30 до $+80$ градусов.

8. Разработанный автономный источник питания позволяет обеспечить все элементы системы диагностики стабилизированным напряжением 12В при потребляемом токе до 0,2А.

9. Разработанные методы расчета параметров трансформаторов тока и напряжения, обеспечивающих его электроэнергией от сети питания ЭМ, дают возможность рассчитывать их для широкого диапазона величин выходных напряжений и токов.

10. В разработанном устройстве диагностики эксцентриситета ротора емкостные ИП, одним из электродов которых является вал ротора, размещаются внутри ЭМ, а все остальные элементы системы диагностики в виде единого блока на внешней ее поверхности. Что позволяет отказаться от длинных соединительных проводов и достаточно просто обеспечить защиту элементов системы от воздействия электрических и магнитных полей, более «легкий» температурный режим работы, возможность контроля исправности устройства и его регулировку без разборки этой машины.

11. В разработанном устройстве диагностики эксцентриситета ротора емкостные ИП, одним из электродов которых металлическая фольга на пазовом клине статора, а другим поверхность сердечника ротора или полюсов, измерительная цепь размещаются на пазовом клине ИП, а все остальные элементы системы диагностики в виде единого блока на внешней поверхности ЭМ. Что значительно упрощает конструкцию и установку ИП.

Апробация результатов исследования - основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 17-ой Международной конференции " Сатпаевские чтения " (г.Павлодар) в апреле 2017 года, на 9-ой Международной конференции " Торайгыровские чтения " (г.Павлодар) в ноябре 2017 года; на VIII Международной научно-технической конференции "Технические науки: проблемы и решения" (г. Москва) в феврале 2018 года.

Публикации. По работе опубликовано 11 печатных работ, в том числе в журналах рекомендованных ВАК РК – три, две статьи в журнале «Вестник ОмГТУ» (Россия), а также подана 3 патента на изобретение- 2 из них – в РК, 1 – в РФ. Также две статьи принята к публикации, а именно: в журнале

«Электротехника» (г. Москва, Россия), 2019г., в журнале «Przegląd Elektrotechniczny» (Польша), 2018г., входящем в базу цитирования Scopus .

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения и 2 приложений. Работа изложена на 101 страницах, содержит 61 рисунок и 4 таблицы. Список использованных источников включает 80 наименований.

В первой главе рассмотрены конструкционные особенности электрических машин и виды их повреждений. Анализ конструкционных особенностей вращающихся ЭМ показал, что основными причинами возникновения эксцентриситета ротора являются элементы их конструкции, фиксирующие положение ротора относительно статора, при этом основным признаком возникновения эксцентриситета ротора является смещение вала. Используемое в настоящее время технологическое оборудование и человеческий фактор приводят к тому, что заводы по производству ЭМ выпускают продукцию, имеющую технологический эксцентриситет, величина которого может достигать величины 0,1-0,12. Рассмотрены особенности эксцентриситета ротора, который сопровождается неравномерностью воздушного зазора, возникновением в нем дополнительных магнитных полей, ухудшением эксплуатационных характеристик ЭМ и ростом примерно на 0,45-3,95% потерь электроэнергии. Произведенный анализ известных методов выявления эксцентриситета ротора на выведенной из работы ЭМ или в процессе ее эксплуатации наиболее перспективным является метод, в котором для получения информации о повреждении используются емкостные ИП. В связи с этим результаты диагностирования ЭМ не зависят от колебаний параметров питающей сети, бросков нагрузки и изменений параметров ЭМ и ее режима работы. Емкость ИП используемого в системе диагностики эксцентриситета ротора процессе эксплуатации ЭМ зависит не только от эксцентриситета ротора, но и от формы поверхности сердечника ротора. Поэтому известные методы моделирования емкости не позволяют моделировать параметры такого ИП в процессе вращения ротора.

Во второй главе разработан метод моделирования емкости ИП системы диагностики эксцентриситета ротора, в основе которого лежит метод сеток, позволяет с погрешностью не превышающей 4,5% моделировать ее при произвольной форме электродов. Предложенный «зонный» метод моделирования емкости ИП системы диагностики эксцентриситета ротора позволяет просто и с погрешностью расчета не превышающей 13% моделировать ее зависимость от положения зубцов ротора при его вращении. Выявлен информационный признак эксцентриситета ротора, который может определяться путем анализа спектра гармонических емкости ИП от величины эксцентриситета этого ротора. В асинхронных машинах, в которых одним из электродов емкостного ИП системы диагностики является поверхность вала ротора или поверхность ротора с закрытыми или открытыми пазами, в качестве информационного признака повреждения в системе диагностики следует

использовать его постоянную составляющую. В синхронных машинах, в которых одним из электродов емкостного ИП системы диагностики является поверхность явнополюсного ротора, в качестве информационного признака повреждения можно использовать как его постоянную составляющую, так первую гармоническую составляющие его емкости. В синхронных машинах, в которых одним из электродов емкостного ИП системы диагностики является поверхность неявнополюсного ротора, в качестве информационного признака повреждения следует выбирать его постоянную составляющую, так как величина первой гармонической составляющей на порядок меньше.

Выявлено, что в наибольшей степени требованиям системы диагностики эксцентриситета ротора ЭМ с ИП, один из электродов которого заземлен, подходит измерительная цепь в виде измерительного моста с полосно-пропускающим фильтром, мост которого питается генератором высокой

В третьей главе для измерительной цепи совершенствуемой системы диагностики доработаны в Павлодарском государственном университете им. С.Торайгырова на кафедре «Электроэнергетика» совместно с к.т.н. А.В.Мануковским кварцевый генератор и его программное обеспечение способны обеспечить в достаточной степени стабильность частоты и амплитуды, а также допустимый уровень гармоник генерируемого сигнала в требуемом диапазоне температур. Выявлено, что двухступенчатый фильтр на гираторах способен обеспечить полосу пропускания в 5кГц при добротности $Q = 60\text{дБ}$ в диапазоне рабочих температур способен от -30 до $+80$ градусов, что является вполне достаточным для реализации системы диагностики. Произведен анализ, в результате которого подобран автономный источник стабилизированного постоянного тока, способный обеспечить питание генератора высокой частоты и двухступенчатого фильтра системы диагностики низковольтных и высоковольтных электрических машин с помощью малогабаритного и дешевого трансформатора напряжения, а также с помощью серийно выпускаемых разъемных, проходных трансформаторов тока типа ТЗРЛ.

Усовершенствована система диагностики эксцентриситета ротора с емкостным ИП, у которого одним из электродов является вал ЭМ, способна контролировать не только перемещение вала, но и направление перемещения. При этом все ее элементы располагаются на внешней поверхности ЭМ, а потому их достаточно просто экранировать от внешнего электрического и электромагнитного поля и обеспечить доступ для контроля работоспособности устройства и выставления порогов срабатывания.

Усовершенствована система диагностики эксцентриситета ротора, один из электродов емкостного ИП которой в виде фольги размещается на пазовых клиньях также контролировать не только перемещение вала, но и направление перемещения. При этом измерительный мост и полосно-пропускающий фильтр размещаются на выступающей части пазового клина, а остальные элементы на внешней поверхности ЭМ. В связи изготовление и установка ИП значительно упрощается.