

А.С. АКАРМАЗЯН

**МЕТОДОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ГЕНЕРАТОРОВ МАЛЫХ ГЭС:
АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

Высокая степень изношенности оборудования ГЭС может привести к увеличению частоты аварий, риска техногенных катастроф и другим серьезным сбоям в энергообеспечении. Во избежание любых сбоев во время эксплуатации необходимо проводить техобслуживание, основанное на данных о состоянии машины, а также мониторинг важных параметров, характеризующих состояние машины. Существующие коммерческие системы невыгодны, многие из них из-за дороговизны не получили широкого применения при обслуживании электрических машин малой мощности. С этой точки зрения, недорогие системы, основанные на подходящих алгоритмах и группировке правильно подобранных датчиков и устройств, со временем становятся необходимостью. Представлены существующие методы мониторинга. Разработаны этапы новой методологии оценки состояния генераторов МГЭС и определены требования к системе мониторинга и автоматического управления.

Ключевые слова: мониторинг, гидрогенератор, системы автоматизации, возобновляемая энергия.

Производство электроэнергии, основанное на являющейся возобновляемым энергоресурсом гидроэнергетике, для стран, лишенных топливно-энергетических ресурсов, по существу, является одним из приоритетных направлений развития энергетики.

В области управления ГЭС даже незначительное улучшение может привести к существенной разнице в расходах и доходах. Важной составляющей ГЭС считается гидрогенератор. Принцип строения генераторов схож, а их недостатки во время эксплуатации проявляются одинаковым образом. Известно, что генераторы имеют минимальное время вращения ротора и статора и служат 20...30 лет, до перемотки [1]. Исходя из сказанного и исследуя информацию об основных показателях станций, предоставленную армянскими компаниями, эксплуатирующими малые ГЭС (МГЭС), следует отметить, что многие электрические машины достигли критического состояния износа [2].

Исследования, связанные со сроками эксплуатации генераторов, потенциалом пригодности составляющих систем машин, онлайн системами сбора и обработки данных в реальном времени, а также с автоматизацией электрических машин, со временем становятся все более актуальными, что обусловлено сложностью определения изношенности агрегата в рабочем режиме и анализа изношенности в стационарном режиме, а остановка работы агрегата приводит к потере времени,

ресурсов и возможной производимой продукции. Эта область исследований периодически расширяется, их конечной целью является создание такой системы мониторинга, которая максимально удовлетворит соотношению цена-качество, существенно сократит расходы на эксплуатацию и обслуживание, уменьшит количество аварий.

На разные компоненты гидрогенератора может оказываться ряд воздействий: электрическое, термическое, механическое, воздействие окружающей среды и так называемые "групповые воздействия". Для оценки состояния гидрогенераторов важно различать коренные причины проблем и виды неисправностей. В таблице обобщены наиболее часто встречающиеся коренные причины и виды неисправностей гидрогенератора.

Таблица

Коренные причины и виды неисправностей гидрогенератора

Коренные причины	Виды неисправностей
• Ошибки в проектировании или производстве • Неполноценное сырье или поврежденный компонент • Ошибки в установке • Ненадлежащее обслуживание или неправильная эксплуатация • Состояние внешней среды • Превышение скорости • Перенагрузка • Малоцикловая усталость или ударные нагрузки • Высокоцикловая усталость или слишком большая вибрация • Неисправность в компоненте • Перегрев обмотки • Перегрев подшипников • Слишком большое диэлектрическое воздействие (постоянное или временное) • Мусор или загрязнение • Коррозия	• Неисправности изоляции ядра • Неисправности изоляции обмотки статора • Неисправности изоляции обмотки ротора • Неисправности щеток • Неисправности контактных колец • Неисправности в коммутаторе • Неисправности в подшипниках • Неисправности в механической целостности ротора • Неисправности в механической целостности статора

Для того, чтобы обнаружить возможные неисправности в машине, необходимо произвести мониторинг ряда параметров, дающих качественную оценку

состояния машины. К классу параметров, характеризующих реальное состояние гидроагрегатов, относятся номинальное напряжение и ток, мощность, напряжение возбуждения, температура обмотки и якоря, скорость и ускорение статора, частичные разряды, температура подшипников, уровень масла в подшипниках и ряд других параметров, влияющих на состояние системы охлаждения [3]. Исследуя существующие методы и изучаемые в них параметры, можно классифицировать системы мониторинга следующим образом (рис. 1).



Рис. 1. Классификация методов мониторинга гидрогенератора

Системы мониторинга обычно разрабатываются для специфических целей и специфических машин. В частности, гидрогенератор мощностью 35 МВт для мониторинга может иметь датчик магнитной индукции, температуры, а также тока ротора, напряжения ротора, напряжения сети, ускорения вибрации – всего 51 сигнал.

Существует ряд методов мониторинга. К числу встроенных методов относится сенсорная технология, вмонтированная в ротор. Непрерывно подвергаются мониторингу воздушный зазор между двумя осями, температура ядра статора (используется ИК сенсор), месторасположение частичных разрядов, плотность магнитного потока. Методы мониторинга температуры используются для обеспечения соответствующей температуры различных компонентов машины, предписанной стандартами [4].

Выделяют три подхода к мониторингу температуры (см. рис. 2.).

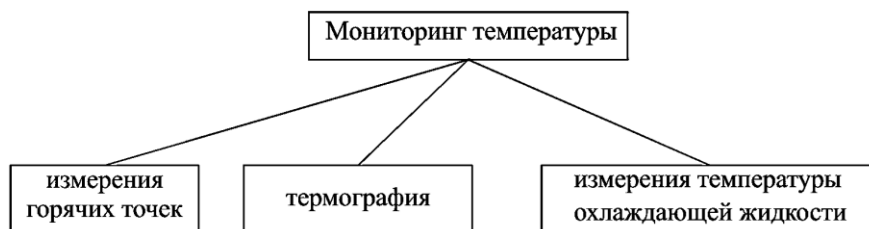


Рис. 2. Классификация методов мониторинга температуры

Первый использует точечное измерение температуры с использованием сенсоров. Этот метод очень прост и экономически выгоден. Однако он имеет недостаток, заключающийся в том, что возможно упустить локальные точки нагрева, и поскольку сенсоры зачастую сделаны из металла, они не могут быть расположены в местах с высокой температурой. Второй подход использует термографию с целью определения температуры движущихся частей, в которых трение играет важную роль. Детализированное тепловое изображение машины, которое ясно выявляет все точки нагрева, может быть получено только с помощью специального дорогостоящего измерительного оборудования. Этот подход зачастую используется для проверки состояния подшипников и гарантирования, что они надлежащим образом смазаны. Последний подход предлагает общий обзор эффективности охлаждающей системы машины посредством измерения температуры охлаждающей жидкости. Этот подход также может быть использован для определения степени загруженности машины. Его основной недостаток заключается в том, что он не предоставляет достаточной информации для точной диагностики грозящей аварии.

Методы мониторинга степени механических вибраций нацелены на гарантирование того, что возбуждение опорных конструкций электрической машины, вызываемое электромагнитными полями и крутящим моментом, на натуральных или других частотах не превышает установленных стандартов.

Выделяют два основных подхода к мониторингу механических вибраций, как показано на рис. 3.

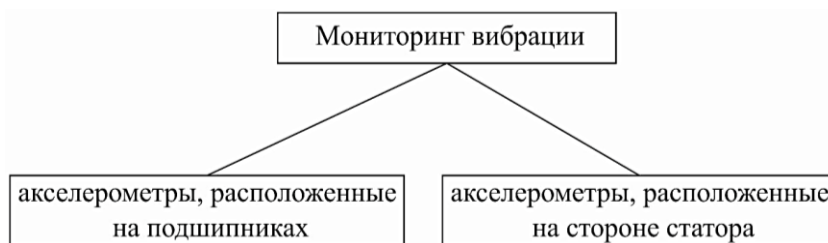


Рис. 3. Классификация систем мониторинга механических вибраций

Поперечное движение может быть обнаружено при использовании сенсоров вибрации, расположенных на корпусе машины. Акселерометры, расположенные на подшипниках (для обнаружения высоких частот), или датчики приближения, расположенные рядом с подшипниками (для обнаружения низких частот), также могут быть использованы, однако установка системы мониторинга сложна для реализации в производстве. По этой причине описываемый метод предлагает располагать акселерометры на стороне статора машины, тем самым общие поперечные движения могут быть обнаружены в диапазоне $0,01 \dots 10 \text{ кГц}$.

Преимущество этого метода в простоте, однако недостаток заключается в низкой чувствительности на ранних стадиях аварии [5].

Для точной оценки состояния активных компонентов машины используются различные процедуры технической диагностики. Таким образом, система изоляции обмотки статора является критическим компонентом генератора, как показали международные опросы и статистика аварий.

Классическими методами для оценки состояния системы изоляции являются измерения показателя рассеивания и/или мощности и анализ тока поляризации/деполяризации.

Частичные разряды оказывают влияние на степень устойчивости и время жизни изоляции:

$$L = cE^{-n},$$

где n – константа степенного закона; c – константа; E – устойчивость изоляции (в кВ/мм); L – время жизни изоляции (в часах).

Частичные разряды – это маленькие электрические искры, которые возникают в воздушных карманах в изоляции или на поверхности изоляции катушки. Эти искры содержат электроны и ионы, которые бомбардируют целостную изоляцию. Органические материалы, такие как пленка, полиэстер, эпоксид, разрушаются под действием бомбардировок вследствие разрушения (разделения) определенных химических связей, таких как углеводородная связь [4]. Мониторинг активности частичных разрядов можно реализовать на основе данных о выделенном озоне.

Озон возникает, когда частичные разряды появляются на поверхности обмотки статора. Мониторинг озона в этом смысле означает выявление частичных разрядов на поверхности. Электрические сенсоры озона, использующие полевые металл–оксид–полупроводниковые транзисторы (МОП), сегодня широко доступны благодаря их низкой цене, так как они разрабатывались изначально для мониторинга загрязнения. Сенсоры озона располагаются внутри корпуса машины, в то время как измерительные инструменты могут располагаться снаружи [5].

Помимо диагностических измерений, технические характеристики (например, год создания, система изоляции, техника пайки) и постоянно заносимые в журнал данные (например, количество стартов, часы работы) снабжают ценной информацией для оценки состояния и рисков использования машин. Например, они дают информацию о нагрузке обмотки статора. Нагрузка обмотки статора зависит от режима работы машин (непрерывный или прерывистый), который имеет критическое влияние на изнашивание изоляции. С помощью сравнения часов работы и количества включений статора машины могут быть разделены на диапазоны различной нагрузки. Другая возможность сравнения машин с разными часами работы и количеством включений – вычислить "эквивалент часов работы":

$$T_E = T_o + n_s T_s ,$$

где T_E - эквивалент часов работы; T_o - период работы, часы работы; n_s – количество стартов; T_s - период работы под особой нагрузкой во время включения машин.

В мире с сопоставимыми расходами такие системы внедряются как в новых ГЭС, так и в старых, в рамках модернизации. Из таких систем самая известная – технология вибрационного управления, созданная компанией "National instruments", которая внедрена в ряде стран, в частности, в Словении, Австралии, Хорватии, где проблемы безопасности и оценки состояния решены с помощью мониторинга относительной вибрации вала, вибрации статора, обмотки статора, подшипников, отклонений подшипников, магнитного поля, активной и реактивной мощностей частичных разрядов, давления, уровня жидкости. Технологии "National instruments" предназначены для обеспечения надежной эксплуатации генераторов в электростанциях до 500 МВт. Вышеописанная технология определяется количеством вибраций. Эта технология включает в себя программируемые модульные платформы производственного назначения (CompactRio), а также специальные программные пакеты для интегрирования с системой SCADA и удобства в настройке [6].

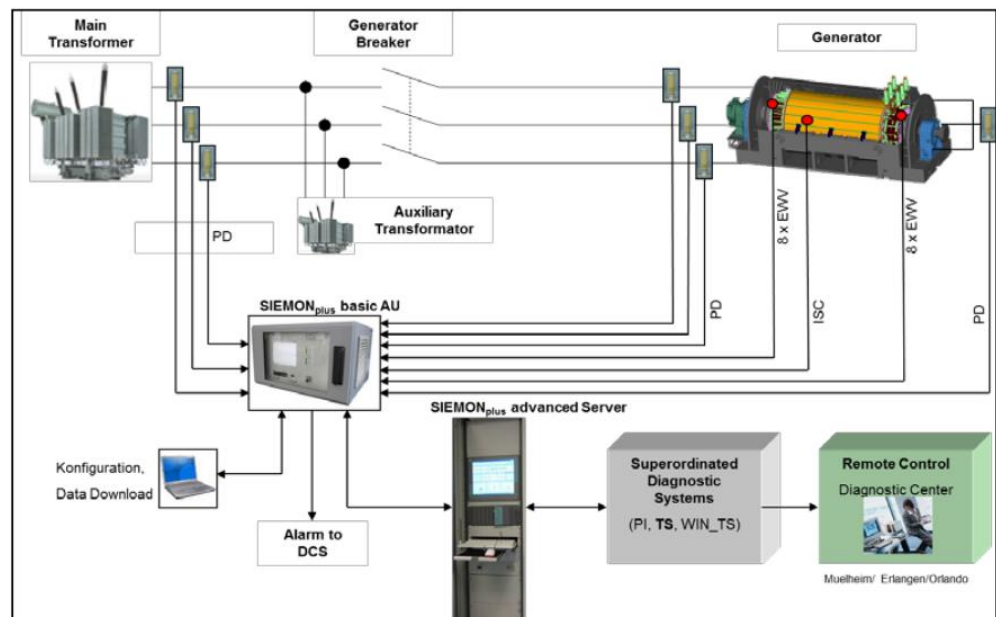


Рис. 4. Схема разработанной системы Siemens

Разработанные Siemens системы оценки и онлайн мониторинга состояния электрических машин также дают информацию в процессе эксплуатации (рис. 4).

Последняя направлена на решение задач обслуживания, которые обусловлены состоянием машины, в частности:

- онлайн мониторинг частичных разрядов, который дает возможность получить информацию о ненормальном состоянии системы изоляции мониторинга;
- система онлайн мониторинга передней части обмотки статора, дающая информацию о настоящих вибрациях в процессе работы, в зависимости от степени нагрузки;
- онлайн мониторинг магнитных потоков в воздушных зазорах, с помощью которого можно выявить короткие замыкания в витках обмотки ротора.

Несмотря на разнообразие существующих устройств и методов, мониторинг работы генераторов МГЭС и динамическое управление износом агрегатов продолжают оставаться актуальной проблемой. Существующие коммерческие системы невыгодны, многие из них дороги, по этой причине они не получили широкого применения при обслуживании электрических машин малой мощности [3]. С этой точки зрения, недорогие системы, основанные на подходящих алгоритмах и группировке правильно подобранных датчиков и устройств, со временем становятся необходимостью.

Система мониторинга и автоматизации работы генераторов МГЭС, основанная на управлении параметрами, которые характеризуют состояние гидрогенератора, дает возможность собирать необходимые данные в реальном времени, обрабатывать их и проводить соответствующий анализ, сообщать информацию о потенциальных авариях и необходимости ремонта генераторов.

Разработка эффективного метода оценки состояния и мониторинга гидрогенератора в целом подразумевает следующие шаги:

- выбор характеризующих факторов;
- разработка моделей деградации;
- формирование группы простых и дешевых устройств для измерения, сбора данных, обработки и регистрации выбранных факторов оценки состояния.

Система мониторинга и автоматизированного управления работой генераторов МГЭС должна обладать следующими свойствами:

- состоять из данных обоснованного количества датчиков, которые всесторонне характеризуют состояние гидрогенератора. Большое количество данных может привести к неоправданным затратам на отображение и обработку данных;
- быть простой, надежной, дешевой и с минимальным вмешательством человека;
- данные должны собираться в реальном времени;
- иметь возможность за короткое время выявить и изучить продолжительные неисправности;

- иметь стратегию принятия решений при необходимости выяснения потребности гидрогенератора в обслуживании, включая также возможности автоматического запуска, безопасной эксплуатации, функции защиты и остановки работы в экстремальной ситуации в условиях отсутствия обслуживающего персонала;

- иметь базу данных, которая позволяет совершать постоянный анализ параметров.

Заключение. Представлены преимущества и недостатки методов измерения наиболее важных параметров, характеризующих состояние генераторов, а также предложены системы мониторинга состояния генераторов, разработанные известными компаниями. В результате исследования разработаны этапы новой методологии оценки состояния генераторов МГЭС и определены требования к системе мониторинга и автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.** Electrical Insulation for rotating machines – Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair. 1st edition.- Wiley Interscience, Canada, 2004.- 371p.
2. **Հայաստանի Հանրապետության Հանրային ծառայությունները կարգավորող հանձնաժողով:** Էլեկտրական էներգիա արտադրող փոքր հիդրոէլեկտրակայանների հիմնական ցուցանիշները 2014 թվականի հոկտեմբերի 1-ի դրությամբ՝ ըստ շահագործող ընկերությունների, <http://www.psrc.am/>
3. **Акармазян А.С.** Выбор основных параметров, определяющих состояние и изношенность генераторов малых гидроэлектростанций // Вестник Инженерной академии Армении.- 2014.- Т.11, №2.- С. 262-266.
4. **Warwel M., Wittler G., Hirsch M., Reuss H.C.** Real-time coolant temperature monitoring in power electronics using linear parameter-varying models for variable coolant flow situations//Thermal Investigations os Ics and Systems (THERMINIC): 20th International Workshop.- 2014.- P. 1 – 4.
5. Insulation Failure Mechanisms of Power Generators / **R. Brutsch, M. Tari, K. Frohlich et al** // Electrical Insulation Magazine, IEEE.- 2008.- V.24, I.4.- P. 17 - 25.
6. <http://siemens.com/energy> Early detection and diagnostics of initiating damage in turbogenerators, 2014.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 15.02.2015.

Ա.Ս. ԱԿԱՐՄԱԶՅԱՆ

ՓԶԷԿ-Ի ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ՄՈՆԻԹՈՐԻՆԳԻ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ: ՎԻՃԱԿԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ ԵՎ ԱՌԱՋԱՐԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Հիդրոէլեկտրակայանի սարքավորումների բարձր մաշվածության աստիճանը կարող է հանգեցնել վթարների հաճախության աճի, տեխնածին աղետների ռիսկի և էներգաապահովման մի շարք լուրջ խափանումների: Շահագործման ընթացքում խափանումներից խուսափելու համար կարևոր է կատարել տեխսպասարակում՝ հիմնված մեքենայի տեխնիկական վիճակի տվյալների վրա, ինչպես նաև անցկացնել մեքենայի վիճակը բնութագրող կարևորագույն պարամետրերի մոնիթորինգ: Գոյություն ունեցող կոմերցիոն մոնիթորինգի համակարգերը շահավետ չեն, դրանցից շատերը թանկարժեք են, որի պատճառով լայնորեն չեն կիրառվում փոքր հզորությամբ էլեկտրական մեքենաների դեպքում: Այս տեսանկյունից նոր, քիչ ծախսատար համակարգերը՝ հիմնված ինտելեկտուալ ալգորիթմների, ճիշտ ընտրված տվիչների և սարքավորումների համախմբի վրա, գնալով անհրաժեշտություն են դառնում: Հոդվածում ներկայացված են արդեն գոյություն ունեցող մոնիտորինգի մեթոդները, ինչպես նաև մշակվել են ՓԶԷԿ-ի գեներատորների վիճակի գնահատման նոր մեթոդաբանության փուլերը, և սահմանվել են մոնիթորինգի ու ավտոմատ կառավարման համակարգի առջև դրված պահանջները:

Առանցքային բառեր. մոնիթորինգ, հիդրոգեներատոր, ավտոմատացման համակարգեր, վերականգնվող էներգիա:

A.S. AKARMAZYAN

A METHODOLOGY FOR MONITORING THE SHPP GENERATORS: ANALYSIS OF THE STATE AND RECOMMENDATIONS

The high degree of deterioration of HPP equipment may lead to the increase of accidents, the risk of technological disasters and other serious disruptions in energy supply. In order to avoid any in-service failure, it is necessary to maintain and monitor the vital parameters which characterize the condition of the machine. The existing commercial systems are not profitable, most of them are expensive therefore are not widely used in low power electrical machines. From this viewpoint, cheap systems based on convenient algorithms and correctly selected sensors and equipment become necessary with the lapse of time. The existing methods for monitoring systems are presented, stages of a new methodology for condition evaluation of SHP' generators have been developed and requirements for the monitoring and automatic control system have been defined.

Keywords: monitoring, hydrogenerator, automation systems, renewable energy.