

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Г. А. Атанасян и Х. Р. Палян

Динамическое моделирование гидроэнергосистем

Под редакцией действ. чл. АН Арм. ССР И. В. Егiazарова

1. В в е д е н и е

В настоящей статье подведены итоги работы отдела моделирования Гидроэнергосистем, созданного Водно-Энергетическим Институтом АН Арм. ССР по инициативе действ. чл. АН Арм. ССР И. В. Егiazарова с 1946 года.

Первоначально непосредственной задачей этого отдела являлось освоение теории физического моделирования электросистем, созданной в ССР преимущественно работами доцента В. А. Веникова, и дальнейшее совершенствование и углубление этой теории. В этом направлении произведена подготовка к решению задачи, имеющей специфический интерес для гидроэнергетики Армении.

После окончания этой первой стадии работы, в процессе выполнения которой в Гидро-электрической лаборатории ВЭИ создавалась группа специалистов, к работам которой привлечен В. А. Веников, был поставлен вопрос о сооружении динамической модели гидроэнергосистемы.

Сооружение такой модели является делом весьма нелегким: достаточно указать, что в такой мощной организации как МЭИ динамическая модель проектировалась и сооружалась в течение более пяти лет и до сих пор не закончена полностью. Медленными темпами идет сооружение динамических моделей в ЦНИЭЛ-е МЭС, Энергетическом Институте АН Узбек. ССР и некоторых других организациях.

Водно-Энергетический Институт пошел по несколько отличному пути. Положив в основу теоретические разработки доц. В. А. Веникова, Институт отказался от осуществления спроектированного Вениковым универсального генератора-модели, сооружение которого, однако, связано со значительными производственными трудностями.

В основу модели ГЭЛ было положено предложение, разработанное членом-корр. АН СССР М. П. Костенко.

Это предложение также подверглось существенной переработке и упрощениям, позволившим в короткий срок провести рабочее проектирование модельного комплекта силами сотрудников Ереванского Электро-машиностроительного завода и провести на этом же заводе

изготовление названных машин. Одновременно с этим был закончен и проект остальных частей первой очереди динамической модели ВЭИ, которая теперь уже близка к завершению.

2. Постановка задачи. Появление необходимости в динамических моделях

Новые задачи, которые придется разрешать советским энергетикам при осуществлении Сталинских пятилеток, требуют новых средств анализа, новых методов исследования. Все более острой становится необходимость быстрого и возможно более точного решения усложняющихся и исключительно трудоемких расчетных задач, носящих одновременно и проектный и научно-исследовательский характер.

Аналитические способы решения этих задач, применявшиеся до настоящего времени, несмотря на их развитие, не могут удовлетворить инженера, проектирующего и эксплуатирующего новые грандиозные энергосистемы СССР.

Аналитические методы исследования приводят к громоздкости вычислений, требующих огромной затраты времени и труда.

Для того, чтобы сделать аналитическое решение возможным, а также для сокращения времени и облегчения расчетов, приходится вводить целый ряд упрощающих предположений, часто весьма произвольных и физически недостаточно обоснованных.

Разумеется, что это обстоятельство приводит к снижению надежности получающихся результатов. Если применительно к существующим системам неизбежные при таком положении неточности как-то корректировались опытом^{*}, то применительно к решению новых задач, таких задач, которые должны решаться до того, как будет накоплен соответствующий практический опыт, аналитический подход без надлежащей опытной проверки становится совершенно неудовлетворительным.

Весьма специфическим моментом в рассматриваемой нами проблеме является то обстоятельство, что гидроэлектрическая система от подводящих воду трубопроводов до шин, где подключена нагрузка, является в сущности единым, неразрывным целым. Отдельные части этой системы: электрическая, механическая, гидравлическая—тесно связаны друг с другом и оказывают влияние друг на друга. Между тем расчеты и аналитические исследования принято производить отдельно, независимо для каждой из этих частей. Этот разрыв неизбежно снижает общую ценность решения задач, возникающих при проектировании и при эксплуатации объединенных гидроэлектрических систем. Попытки расширить аналитическое решение встречают трудности двух видов: недостаточные возможности опытной проверки допущений, делаемых при составлении уравнений

* Легко показать, что и на ряд вопросов, возникающих при сооружении и эксплуатации даже не очень больших систем существующие аналитические методы не дают исчерпывающего ответа.

и сложность решения уравнений, составленных с теми или иными обоснованными или необоснованными допущениями. Преодоление трудностей решения уравнений направляет инженерную мысль на пути изыскания механизации и автоматизации вычислительных операций и облегчения этим аналитических расчетов. Здесь можно упомянуть о ряде счетно-решающих машин от арифмометра до механического интегратора, построенного в ЭНИН-е АН СССР И. С. Бруком, и о различных конструкциях расчетных столов постоянного и переменного тока. К расчетным моделям надо отнести электроинтеграторы Л. П. Гутенмахера с электрическими схемами для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, а также различные электромодели и механические модели, основанные на принципе аналогий. Установки этого рода непрерывно совершенствуются; они весьма остроумны и, значительно облегчая труд, экономят время при решении сложных дифференциальных уравнений. Однако они не могут способствовать проверке исходных положений и допущений, положенных в основу при составлении тех или иных уравнений и не могут дать удовлетворительный ответ на вопросы, относящиеся к взаимосвязи отдельных частей мощной энергосистемы с динамическими элементами-агрегатами электрических станций.

3. Моделирование электросистем, как метод, тесно связывающий аналитические и экспериментальные пути исследования

Решение вопросов описанного характера, весьма существенных для энергетики, очевидно, должно идти по пути моделирования, по пути более тесной связи теории и эксперимента.

Советские ученые и инженеры много работали в этом направлении, разрабатывая методы экспериментальных исследований решения разнообразных и сложных задач, возникающих в практике проектирования и эксплуатации электротехнических устройств.

Комплексные динамические модели электрических систем должны дать наиболее эффективное решение и открыть широкие возможности учета взаимосвязи процессов, происходящих во всех частях мощных гидроэлектрических систем. Такие комплексные динамические модели, строящиеся с возможно строгим соблюдением основных законов физической теории подобия в соответственно уменьшенном масштабе, копируют мощные системы. Применение законов теории подобия и методов моделирования позволяет с достаточной точностью отражать процессы, имеющие место в действительных мощных системах. В то же самое время модели систем обеспечивают возможность повторения исследуемых процессов и детального изучения их в условиях, всецело зависящих от воли экспериментатора. Возможности экспериментального исследования различных теоретических и практических вопросов расширяются применением, наряду со строгими

методами теории подобия, методов комбинированного или же приближенного моделирования.

Начало разработки таких методов, в части моделирования электросистем, положено работами В. А. Веникова и, несомненно, что тот путь, по которому идут работы Лаборатории моделирования ГЭЛ ВЭИ, должен привести к дальнейшему совершенствованию динамических моделей и облегчению их сооружения. Кроме этого, следует особо подчеркнуть значение, которое динамические модели гидро-электрических систем могут иметь для подготовки кадров инженеров и научных работников; следует подчеркнуть их педагогическое значение. Модели открывают неограниченные возможности демонстрации и изучения различных режимов, наблюдающихся при эксплуатации систем, но сравнительно редко имеющих место в действительных условиях. Таким образом, может быть создан такой опыт работы в системе за несколько лет, который нельзя получить, работая только в действительной энергосистеме за десятки лет.

Производить научные исследования в таких случаях в действительных системах по вполне понятным причинам, в большинстве случаев, невозможно. Если иногда такие возможности и представляются, то неизбежные ограничения в условиях эксперимента в той или иной степени снижают ценность получаемых результатов.

При моделировании электрических систем имеют место трудности другого характера. Прежде всего здесь существенным оказывается то обстоятельство, что характер процессов, происходящих в электрических машинах, в сильной степени зависит от геометрических размеров машин. Эта зависимость ставит перед экспериментатором ряд требований, удовлетворение которых может быть затруднительно. Дальнейшими ограничениями являются:

1. требование одинаковости характеристик холостого хода у модели и у оригинала и
2. одинаковости характеристик механических моментов первичных двигателей,
3. требование малых активных потерь в железе машин моделей (1,5%), потерь на трение о воздух (0,25%) и потерь на трение в подшипниках.

Разумеется, что в каждом отдельном случае вопрос об ограничениях эксперимента должен быть проверен особо.

4. Краткий исторический обзор применения моделирования в электротехнике

Построение моделей для изучения на них процессов, происходящих в действительных устройствах, уже давно завоевало прочное место в различных областях техники: в аэродинамике, гидротехнике и теплотехнике.

Построение модели основывается на физической теории подобия, разрабатывавшейся физиками и инженерами еще со времен Нью-

тона, но получившей наиболее полное развитие в Советском Союзе, в трудах советских ученых [1, 5].

Здесь следует упомянуть работы акад. М. В. Кирпичева, особенно развившего теорию подобия в применении к теплотехнике [1].

Большое применение находит теория подобия в гидродинамике и ее технических приложениях [4]. Здесь можно было бы сослаться на ряд работ, проводимых в ГЭЛ ВЭИ действит. членом АН Арм. ССР И. В. Егизаровым и под его руководством [9].

Моделирование основных элементов электрических систем—синхронных генераторов—вначале пытались свести к простой подгонке параметров модели, выраженных в относительных единицах, к параметрам природы, не пытаясь применять теорию подобия.

Таковы были первые попытки создания модели в ВЭИ (Р. А. Майер, 1935 г.), в Энергетическом Институте АН СССР (Веников, 1935 г.) [6], в Ленинградском Политехническом Институте им. Калинина (В. И. Иванов, 1939 г. и В. А. Толвинский, 1939—41 г.г.) [10].

Модель энергосистемы, построенная Вениковым в ЭНИИ-е, была в дальнейшем усовершенствована, причем особое внимание было уделено созданию устройств, обеспечивающих изменчивость параметров в соответствии с требованиями теории подобия. На этой же модели автор ее специально исследовал возможности созданной им теории приближенного моделирования [10]. В дальнейшем Вениковым был выполнен ряд оригинальных работ, создавших теорию моделирования электрических систем, полностью согласованную с основными положениями физической теории подобия. В дальнейшем эти теоретические исследования находят свое отражение в строящейся динамической модели МЭИ (1943—1949 г.г.).

Над вопросами создания динамической модели энергосистемы плодотворно работал член-корреспондент АН СССР и крупнейший специалист по теории электромашиностроения М. П. Костенко, построивший в 1942 г. динамическую модель. Эта модель позволила упростить и ускорить проверку устойчивости параллельной работы гидроэлектростанций одной советской системы и тем содействовать скорейшему расширению этой системы и вводу в эксплуатацию новых мощностей и нагрузок [8]. В дальнейшем к сооружению динамических моделей приступили Энергетический Институт АН Узб. ССР и Центральная Лаборатория Министерства Электростанций СССР (дока еще только проекты).

В 1945 г. в эту работу включился Водно-Энергетический Институт ВЭИ АН Арм. ССР, поставив своей задачей охват гидроэнергосистемы в целом, в ее гидравлической, механической и электротехнической части.

К концу 1948 года была закончена работа по освоению теории моделирования энергосистем, намечены теоретические основы будущей модели ВЭИ и, наконец, был составлен эскизный проект этой модели с основной ориентацией на задачи, непосредственно стоящие

перед гидроэнергетикой Армении.* В дальнейшем были определены задачи, которые должны будут решаться с помощью этой модели и была установлена очередность решения этих задач в зависимости от потребностей практики эксплуатации и дальнейшего развития энергетики Арм. ССР.

5. Краткий обзор теорий моделирования гидроэнергосистемы в ее электрической части

Моделирование электрических систем требует знакомства с общей теорией физического подобия и знания физики моделируемых явлений.

Напомним вкратце основные теоремы теории подобия, сформулированные применительно к задачам моделирования электрических систем Вениковым.

Первая теорема гласит, что для создания физического подобия процессов необходимо и достаточно вызвать подобные явления, производя подобные действия в подобных электрических схемах.

Основы теории подобия в электротехнике остаются теми же, что и в других областях науки и техники. Так, в основных положениях теории подобия, изложенных Егизаровым [9], указывается, что постоянные множители, характеризующие переход от одного явления (модели) к другому (натура), нужно выбирать так, чтобы в обоих случаях дифференциальное уравнение удовлетворялось. Подобные схемы имеют то свойство, что дифференциальные уравнения их приводятся к одинаковому виду после преобразования их констант и изменения масштабов их переменных.

Согласно второй теореме для возможности моделирования электромеханических процессов в электрических системах необходимо иметь одинаковые собственные взаимные постоянные времени во всех контурах. Математически это выражается так:

$$T_k = \frac{\omega L_k}{r_k} = \text{idem} \quad \frac{i_a}{i_k} T_{ak} = \text{idem},$$

$$\text{где } T_{ak} = \frac{L_{ak}}{r_k t}, \text{ или в случае}$$

емкостной связи

$$T_{ak} = \frac{C_{ak} r_k}{t} = \frac{C_{ak}}{g_k t}$$

и одинаковые постоянные инерции

$$M = \frac{2749 G D^2 n^2}{1000 W}$$

* К работам по решению этих задач в ВЭИИ были привлечены доц. к. т. н. В. А. Веников, активно помогавший коллективу отдела моделирования ГЭЛ, и чл.-корр. М. П. Костенко, любезно предоставивший в распоряжение ГЭЛ выполненные им проекты машин-моделей.

Кроме того, необходимо соблюдать равенство потерь на трение в подшипниках и потерь в железе у оригинала и у модели.

Предварительным и необходимым условием правильности моделирования является одинаковость характеристик холостого хода у оригинала и у модели.

Для того, чтобы две системы были подобны, необходимо, чтобы были неизменны в течение всего исследуемого процесса критерии подобия этих систем. Критериями же подобия принято называть определенные комбинации, комплексы, нескольких величин, характеризующих явление, подлежащее моделированию.

Различаются два вида критериев подобия: определяющие, инвариантность которых является условием получения подобия, и определяемые, инвариантность которых вытекает из наличия определяющих критериев. В работах по теории подобия [4,9,10] приводятся следующие методы нахождения критериев подобия:

1. метод анализа размерностей,
2. метод анализа дифференциального уравнения процесса, записанного в относительной системе координат.

Метод анализа размерностей рекомендуется применять в случаях, когда дифференциальное уравнение моделируемого явления неизвестно. Здесь необходимо глубокое проникновение в физику моделируемого процесса, и возможно, производство дополнительных исследований, уточняющих результаты [2].

В случаях же, когда дифференциальное уравнение системы известно, оно приводится к безразмерному виду, после чего определением аналогов получают искомые критерии подобия.

В дальнейшем приводим краткую сводку основных критериев подобия, магнитно связанных, вращающихся друг относительно друга электрических контуров.

1. Критерии электромагнитных скоростей записываются так:

$$\frac{L'_k}{r_k t} = T_k = \text{inv}, \quad \frac{i_a L_{ak}}{i_k r_k t} = \frac{i_a}{i_k} T'_{ak} = \text{inv}$$

Эти критерии являются критериями подобия скорости изменения электромагнитного состояния любых сложных электрических цепей.

2. Дальнейшим критерием, важным для электромеханических процессов, является критерий подобия механической скорости.

$$M' = \text{inv} \frac{J_0}{M_{\text{мех}} t^2} = \text{inv},$$

где M' — постоянная инерции в относительных единицах

J_0 — момент инерции машины

$M_{\text{мех}}$ — механический вращающий момент на валу генератора.

3. Определяющим критерием, устанавливающим соответствие во времени у модели и натуры мгновенных значений переменных величин (u ; i ; δ и т. д.), является критерий гомохронности.

В относительной системе единиц критерий гомохронности следует непосредственно из определения единицы времени

$$t' = 1$$

В именованной системе единиц он дан выражением:

$$\omega t = inv$$

Мы не будем останавливаться здесь на ряде дополнительных (определяемых) критериев подобия, важных для установления масштабов переменных, но легко получаемых в конкретных задачах.

Для нахождения критериев подобия можно исходить из дифференциальных уравнений синхронной машины Горева-Парка [10].

Эти уравнения с достаточной степенью точности описывают процессы, происходящие в синхронных машинах любой мощности, частоты и конструкции.

Метод моделирования заключается в следующем:

уравнения модели и оригинала записываются так, что номинальные мощности и токи машин принимаются за базисные. При этом предполагается, что частоты обеих систем равны [7].

Выражая параметры модели (М) через параметры оригинала (О), имеем:

$$r_m = p_r r_o ; X_m = p_x X_o ; M_m = \frac{1}{p_m} M_o \quad T_m = \frac{1}{p_t} T_o$$

Подставляя выражения, выведенные для параметров модели, в дифференциальные уравнения оригинала, получим систему основных дифференциальных уравнений модели, отличающуюся от дифференциальных уравнений оригинала постоянными коэффициентами p_x ; p_r ; p_m ; p_t .

Формальным и материальным изменением параметров модели добиваются исчезновения этих коэффициентов из уравнения моделирования. Отсюда можно прийти к двум методам моделирования: 1) моделирование при изменении частоты модели и 2) моделирование при равенстве частот оригинала и модели. При этом параметры изменяются включением специальных дополнительных устройств и конструктивными преобразованиями электрических машин.

Стремление максимально облегчить организацию и постановку экспериментов на динамической модели электросистемы, удовлетворив в то же время требованиям теории подобия, побудило разработать методы так называемого приближенного моделирования.

Критерий подобия электромеханических явлений упрощается и может быть кратко записан так:

$$\frac{M}{T_o^2} = idem.$$

Кроме того, необходимо добиться инвариантности $\frac{x}{r}$ целей ста-

тора или соответственной инвариантности собственных и взаимных импеданцев:

$$\left(\frac{X_k}{\Gamma_k} \right)_{ст} = inv \quad Z_{вз} = inv.$$

Результаты опытов на модели заключают в себе те или иные неточности, которые необходимо определять особо в каждом отдельном случае. Этот недостаток модельных экспериментов не существенен, так как в большинстве практически важных случаев погрешности не превышают точности соответствующей точности исходных данных и вполне искупаются целым рядом практических преимуществ. К этим преимуществам относятся: возможность применять в качестве моделей малогабаритные электрические машины серийного производства, возможность широкого и свободного изменения масштаба времени независимо от частоты и т. д.

Возможность применения серийных машин основана на том, что при моделировании электрических систем мы, не желая вдаваться в анализ сложных процессов внутри машин, стремимся моделировать только явления, происходящие вне машины, в сети, но с правильным учетом влияния машины.

Ни геометрическое подобие, ни подобие полей машин оригинала и модели при этом не соблюдаются.

6. Динамическая модель гидроэлектросистемы

Динамическую модель гидроэлектросистемы предполагается смонтировать и пустить в работу двумя очередями:

I-я очередь наряду с возможностями теоретических исследований позволит моделировать две существующие крупные гидроэлектростанции энергосистемы Армении.

а) станция № 1—моделируется синхронным генератором-моделью, условно названным СГ—6,25/6—1000;

б) станция № 2—моделируется синхронным генератором-моделью, носящим название СГ—25/6—1000.

II очередь динамической модели позволит моделировать две новые гидроэлектростанции куста;

в) станция № 3—моделируется синхронным генератором типа СГ—6,25/6—1000;

г) станция № 4—моделируется синхронным генератором СГ—25/6—1000.

Весь комплект электродинамической модели будет состоять из блоков электрических машин, которые монтируются на специальных стендах.

В состав модели входят:

- а) стенд основных агрегатов,
- б) стенд компенсаторов,
- в) стенд возбуждательных агрегатов.

а) Стенд основных агрегатов. На стендах основных агрегатов устанавливаются две группы машин: первая группа машин состоит из синхронного генератора типа СГ—6, 25/6—1000 со своим электродвигателем ПН—100 (машины постоянного тока). На одном валу с этими машинами находится специальная машина для измерения угла между ЭДС этих машин и напряжением (δ).

Вторая группа машин состоит из синхронного генератора типа СГ—25/6—1000 и электродвигателя типа ПН—290. Генератор первой группы машины мощностью в 6,25 ква переделывается из нормальной машины типа СГ—35/6—1000.

Генератор второй группы машин аналогичным образом переделывается из стандартной машины типа С—125/6—1000. В основном переделка вызвана необходимостью уменьшения активного сопротивления статорных обмоток генераторов и подгонки остальных параметров (реактансов) машины под параметры оригинала, т. е. действительных машин, подлежащих моделированию.

Специальные машины для измерения угла „ δ “ конструируются из низковольтных машин постоянного тока.

б) *Характеристика машин, применяемых для моделирования.* Перечисленные выше машины, применяемые для моделирования, сооружаются, как уже указывалось выше, на базе серийных машин типа СГ. Однако машины модели ВЭИ существенно отличаются от типовых машин.

Модель генератора первой очереди сооружается на базе нормального синхронного генератора типа СГ—35/6, выпускаемого Ереванским Электромашиностроительным заводом. Согласно технических условий, разработанных ВЭИ, генератор должен иметь нижеследующие технические данные:

В цепь возбуждения последовательно включается серийный генератор, создающий отрицательное сопротивление, уменьшающее суммарное сопротивление цепи в 6 раз. Характеристика холостого хода должна быть стандартной. Постоянная инерция генератора должна быть увеличена при помощи специальных дисков, укрепляемых на валу генератора:

$$M_{\text{диск}} = M_1 - M_2 + M_{\text{зап.}}$$

где $M_{\text{диск}}$ — постоянная инерция дисков,

M_1 — постоянная инерция натуре 6—6,5 сек,

M_2 — постоянная инерция генератора и двигателя после переделки,

$M_{\text{зап}}$ — 12 сек.

Количество маховых дисков должно быть таким, чтобы момент инерции можно было изменять через 1,5 секунды, причем надо изготовить один диск для подгонки момента инерции агрегата до целого числа. При разработке проекта и составлении рабочих чертежей

№ п/п	Наименование	Данные	Примечание
1	Мощность после переделки	6,25 квт	
2	Напряжение	230 вольт	
3	Число оборотов	1000 об/мин.	
4	Число фаз	3	
5	Частота	50 пер сек.	
6	Коэффициент мощности	0,8	
7	Активное сопротивление статорной обмотки	минимально возможное при данных габаритах.	
8	Реактивное сопротивление статорной обмотки		
9		$X_d = 112 - 115\%$	Необходимо регулирование X_d в пределах $\pm 20\%$
10		$X_c = 8 - 10\%$	
11		$X_q = 70 - 75\%$	
12		$X_s = 18 - 22\%$	
13		$X'd = 30 - 35\%$ $X''d = 20 - 25\%$	

Данные по ротору должны быть следующими:

Ротор генератора	Величина
Номинальный ток возбуждения (длительный)	5,2 А.
Кратковременный ток	15,6 А.
Активное сопротивление	Минимально возможное

генератора на Ереванском Машиностроительном Заводе, удалось сохранить полностью все основные детали (место плюсов ротора и статора, лист полюса возбуждателя и др.), а также целиком применить такие детали, как щиты, вентиляторы, коллектор, траверзы со щеточной арматурой, контактные кольца, подшипниковые узлы и др. Станина генератора и сердечник статора оказались отличными от нормального исполнения лишь только длиной пакета статора. Вал генератора удлинен в связи с тем, что на его рабочий конец должен насаживаться маховик-муфта специальной конструкции, обеспечивающая регулировку постоянной инерции агрегата, не разбирая последнего. Все обмотки генератора (обмотки статора, полюсов ротора, якоря и шунта возбуждателя) выполняются заново.

Статорная обмотка генератора помимо основной её части, имеет также регулировочные добавочные витки, при помощи которых можно регулировать X_d в пределах $\pm 20\%$ от номинального значения.

Схема соединений обмотки приведена на рис. 1.

Как показал электрический расчет синхронного генератора, предъявленные технические условия почти полностью соблюдены, за исключением некоторых значений реактивных сопротивлений (X_s , X'_d и X''_d), которые получились отличными от требуемых данных, приведенных в технических условиях.

v) *Стенд компенсаторов.* Для компенсации активных сопротив-

лений статорных и роторных цепей синхронных генераторов, устанавливаются трехфазные и однофазные коллекторные машины с последовательным возбуждением следующих типов: КГО—85; КГТ—85; КГО—45 и КГТ—45. Указанные машины, так же как и генераторы, являются не стандартными, но выполняются на основе серийных машин постоянного тока (на базе машин ПН—45 и ПН—85). Каждая машина-компенсатор приводится во вращение самостоятельным двигателем, сидящим на одном валу с компенсатором.

г) *Характеристика машин-компенсаторов.*—Как указывалось выше, для компенсации активного сопротивления обмотки возбуждения синхронного генератора типа СГ—6, 25/6 сооружается однофазный коллекторный генератор типа КГО—45, на базе машины постоянного тока типа ПН—45 и по расчетным данным члена-корреспондента АН СССР проф. Костенко М. П. со следующими изменениями:

1. В расчетных данных Костенко наружный диаметр железа статора указан $d=295$ мм. Так как компенсатор должен был изготовляться путем переделок соответствующих деталей и узлов существующей 4-х полюсной машины ПН—45, то для сохранения станины (имеющей фактические размеры внутреннего диаметра $d=288$ мм, а наружного $d=316$ мм), пришлось наружный диаметр железа статора уменьшить до $d=290$ мм, в целях сохранения резьбовых отверстий (в теле стенки для крепления подшипниковых щитов) и толщины самой стенки станины. В связи с этим, для сохранения расчетного значения индукции в стенке статора пришлось уменьшить глубину паза с 36 мм до 34 мм. Уменьшение площади паза вполне возможно, так как 52 проводника всех обмоток из меди ПБД $d=1,81/2,08$ вмещаются в пазу с уменьшенной высотой на 2 мм сравнительно легко. Тем более, что по 52 проводника укладываются всего лишь в восьми пазах, в остальных же пазах будут укладываться либо по 46 проводников, либо по 22 проводника.

2. Для сохранения остова якоря (вместе с пакетом железа, коллектором, валом и подшипниковыми узлами) длину пакета железа якоря пришлось изменить с 100 мм до 110 мм (так как фактическая длина пакета якоря равна 110 мм, а число и размеры пазов якоря согласно расчетным данным Костенко сохраняются такими же, как у ПН—45).

3. Вследствие того, что вылет лобовых частей обмоток не позволял сократить длину станины, глубину подшипниковых щитков, а также расстояние между подшипниками и месторасположения щеточной траверзы, пришлось длину станины нарастить на 30 мм путем постановки двух промежуточных колец (шириною по 15 мм), позволивших, кстати сказать, сохранить диаметры замков у обоих подшипниковых щитов. Таким образом, благодаря введению вышеназванных изменений некоторых величин, заданных расчетом, к приме-

нению несложных новых деталей, удалось сохранить, без больших переделок, все основные детали машины ПН—45.

Применение уже простых промежуточных колец оказалось возможным лишь благодаря удачно примененной и разработанной конструктивной форме катушек обмоток статора. Принципиально развернутая схема всех обмоток статора сохранена полностью, согласно расчетным данным. На рис. 2 приведена схема обмоток компенсатора. Концы всех обмоток статора выводятся в специальную клеммовую коробку, размещенную сбоку станины. Катушка основной и вспомогательной обмотки возбуждения конструктивно выполнена в виде одной 24-витковой катушки с тремя совершенно отдельными парами отводов соответственно от 18-витковой, 3-х витковой первой и 3-х витковой второй частичных катушек, так как витки основной и вспомогательной обмоток должны занимать одни и те же пазы.

Вывод на клеммовую доску начал и концов обеих вспомогательных обмоток (третьей и четвертой) позволяет осуществить регулировку числа витков основной обмотки возбуждения в широких пределах в сторону уменьшения и увеличения без разборки машины.

д) *Стенд возбудительных агрегатов.* Для возбуждения основных генераторов предусматривается установка специальных возбудительных агрегатов. Каждый генератор имеет свой возбудительный агрегат; состоящий из главного возбудителя и подвозбудителя. В качестве главного возбудителя принята машина типа ПН—17,5, в качестве подвозбудителя—машина типа ПН—5. Обе указанные машины сидят на одном валу и приводятся во вращение синхронным двигателем марки АД—31/4.

е) *Схема коммутации модельных установок.* Основные агрегаты электродинамической модели (главные генераторы) собраны по балочной схеме.

Каждый генератор имеет свой трансформатор. Фазы генератора соединены в звезду. Соединение фаз трансформатора со стороны генераторного напряжения (230 вольт) в треугольник, со стороны высокого напряжения (460 вольт) в звезду.

С каждой из фаз синхронного генератора последовательно включается фаза 3-х фазного коллекторного генератора. Включение производится со стороны нулевой точки генератора. С роторной обмоткой синхронного генератора последовательно включается обмотка возбуждения однофазного коллекторного генератора. Включение агрегата (генератор-трансформатор) к шинам 460 вольт сетевого устройства произведено с помощью автоматических выключателей, имитирующих масляные выключатели реальной энергосистемы.

Отключение выключателей в аварийных режимах предусматривается от специально запроектированных релейных устройств. Ком-

плект релейных устройств запроектировано установить на каждом из агрегатов со стороны трансформаторов.

На каждом из генераторов устанавливаются также по два комплекта измерительных трансформаторов тока типа ТК (класс точности 0,5) для включения релейных устройств и контрольно-измерительной аппаратуры. Регуляторы напряжения синхронных генераторов предусмотрено моделировать с помощью устройств быстродействующего возбуждения (БВ) в комбинации с компаундированием генератора по схемам, рекомендованным Министерством Электростанций.

Возможности модели и задачи, замеченные к решению на ней.

Динамическая модель позволит решить целую группу задач непосредственно вытекающих из запросов, возникших при эксплуатации существующей высоковольтной армянской энергосистемы, а также вопросов, возникающих в связи с будущим значительным расширением этой системы.

В первое время, в процессе освоения модели, намечается проведение следующих проверок:

1. проверка устойчивости системы при защите с неселективными отсечками;
2. исследование совместной работы гидрогенераторов, снабженных различными регуляторами напряжения;
3. работа системы при сбросах и набросах нагрузки;
4. анализ аварий и поведение защиты при длительных качаниях, имевших место в системе Арменэнерго.

Тема первой задачи имеет непосредственное практическое значение, так как такого рода защита применяется в системе Арменэнерго. Исследование на модели позволит произвести анализ работы этой защиты при авариях, имевших место в системе Арменэнерго, и позволит установить пути усовершенствования такого рода защиты, а также уточнить методику расчетов. Кроме решения непосредственных задач, возникших в системе Арменэнерго, будут сделаны выводы, имеющие общий интерес и значение для всех систем в Советском Союзе.

Тема второй задачи обусловлена тем, что в системе Арменэнерго имеются самые различные регуляторы напряжения. Представляется весьма интересным экспериментально проверить влияние различия в типах регуляторов или поведение в установившихся и неуставившихся режимах. Полученные здесь выводы могут представить большой практический интерес для системы Арменэнерго и могут быть интересны с чисто теоретической стороны для анализа работы регуляторов различных типов в электрической схеме.

Тема третьей задачи весьма важна, так как в системе Арменэнерго будет применена автоматическая разгрузка по частоте и автоматическое деление системы при возникновении режимов, опасных

для системы в целом. После развития системы Арменэнерго и появления в ней протяженных линий электропередач, вопросы автоматической разгрузки и деление системы на части будут особенно серьезными. Динамическая модель позволит провести полное исследование комплекса, возникающих здесь вопросов. Кроме того, динамическая модель позволит повторить те опыты, которые в настоящее время проводятся в системе Арменэнерго и расширит условия проведения этих опытов. Опыты на модели могут быть проведены в самых широких диапазонах изменений сбросов и набросов, в том числе и в таких случаях, которые будут приводить к нарушению устойчивости системы к недопустимо глубоким, длительным посадкам напряжения и частоты.

Тема четвертой задачи. В системе Арменэнерго имели место аварии, связанные с длительными качаниями. Провести анализ этих аварий исключительно аналитически представляется весьма затруднительным. Динамическая модель позволит выяснить все вопросы такого рода и сделать выводы о необходимых мероприятиях по предотвращению такого рода аварий. Помимо чисто практической стороны, эти исследования на модели будут иметь и теоретический интерес—позволят проверить допущения, принимаемые в существующих расчетных методиках.

Гидроэлектрическая лаборатория Водно-Энергетического Института

Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 5 X 1949

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирпичев М. В. и Михеев М. А.—Моделирование тепловых устройств. Изд. АН СССР, 1936.
2. Бриджмен П.—Анализ размерностей. ОНТИ, 1934.
3. Гутенмахер Л. И.—Электрическое моделирование (Электронинтегратор). Изд. АН СССР, 1943.
4. Зегжда А. П.—Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей. Стройиздат Москва—Ленинград, 1933.
5. Белаши П. М.—К вопросу о моделировании в электротехнике. „Электричество“ № 9, 1939.
6. Веников В. А.—Моделирование электрических систем при помощи вращающихся машин. „Электричество“, № 9, 1939.
7. Веников В. А.—Изучение электрических систем на моделях с вращающимися машинами. „Электричество“, № 2, 1941.
8. Костенко М. П. и Трейвиш Е. Д.—Моделирование электрических машин и трансформаторов при экспериментальном исследовании устойчивости. Тр. ЛПИ № 1, 1946.
9. Егиазаров И. В.—Теория подобия и применение законов подобия к явлениям неустановившегося движения. Изв. АН Арм.ССР (Естеств. науки), № 3,3, 1947.
10. Веников В. А.—Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. „Госэнергиздат“, 1949.

Հ. Ա. Արամայան, Խ. Ք. Փալյան

ՀԻՂՐՈՒՆԵՐԳՈՍԻՍԵՄՏՆԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿ ՄՈԴԵԼԱՑՈՒՄԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հիղրոէլեկտրաստեմնների աշխատանքի հաշվարկման հետ կապված ավելի ու ավելի բարդացող և բացառապես մեծ աշխատանք պահանջող խնդիրների լուծման գոյություն ունեցող անալիտիկ եղանակների քննադատական ակնարկից հետո, հողվածում ապացուցվում է այդ խնդիրների լուծման նոր մեթոդներ կիրառելու անհրաժեշտությունը:

Տեսութայան և փորձի սերտ կապը պահանջում է ֆիզիկական մոդելացման մեթոդների կիրառում:

Աշխատանքում ցույց է տրվում, որ էլեկտրական սխեմաների կոմպլեքս դինամիկ մոդելները կարող են ավելի արդյունավետ լուծում ապահովել և ստեղծում են հզոր հիղրոէլեկտրաստեմնների բոլոր մասերում տեղի ունեցող պրոցեսների փոխազդեցությունը հաշվի առնելու լայն հնարավորություններ:

Ջրա-էներգետիկ ինստիտուտի հիղրոէլեկտրիկ լաբորատորիայում ֆիզիկական նմանության թեորիան և մոդելացումն էլեկտրատեխնիկայում յուրացնելուց հետո ընտրված էր հիղրոէլեկտրաստեմնի մոդելացման ինքնուրույն ուղի: 1948 թվի վերջերին կազմված էր մոդելի էսքիզային պրոեկտ, որը հիմնականում ընդգրկում է այն խնդիրները, որոնք անմիջականորեն զբաղված են Հայաստանի հիղրոէներգետիկայի առաջ:

Հիղրավիճակի և մեխանիկական մասի մոդելացման մեթոդները վաղուց մշակված են և լայնորեն կիրառվում են լաբորատորիայում:

Հողվածում բերվում է հիղրոէներգատիստեմի էլեկտրական մասի մոդելացման թեորիայի հիմնական դրույթների և թեորեմների համառոտ ակնարկ. բերված է նաև լաբորատորիայում կառուցվող հիղրոէլեկտրաստեմի դինամիկ մոդելի հիմնական ավյանների պրոեկտը:

Հողվածի վերջում թվարկվում են մոդելի հնարավորությունները և սահմանվում այն խնդիրները, որոնք բխում են դրություն ունեցող Հայկական բարձր լարման էլեկտրաստեմնի շահագործման դեպքում առաջ եկած պահանջներից. թվարկվում են նաև կառուցվող մոդելի վրա լուծման համար նախատեսված խնդիրները: Այդ խնդիրներն են.

1. սխեմայի աշխատանքը բեռնաթափման և բեռնավորման դեպքում.
2. սխեմայի կայունությունը ստուգումը կիրառվող պաշտպանական մեթոդների դեպքում.
3. տարբեր կարգավորիչներ ունեցող հիղրոէներատորների համատեղ աշխատանքի հեռավորումը.
4. վթարների անալիզը և պաշտպանության բնույթը երկարատև տատանումների դեպքում:

