

ПРЕДИСЛОВИЕ К КНИГЕ

В августе 2011 г. исполняется 100 лет со дня рождения помора технических наук, профессора, заслуженного деятеля пауки РФ, шестого чемпиона мира по шахматам Михаила Моисеевича Ботвинника.

Жизнь М. М. Ботвинника явилась уникальным случаем активного сочетания деятельности шахматиста высочайшего к пасса и профессионала — электроэнергетика, достигшего вы-
мающихся успехов в обоих направлениях.

Деятельность М. М. Ботвинника — ученого-электроэнер-
м • і ка — характеризуется постоянным поиском нового, про-
і россивного. В этом отношении являются характерными две
110 теоретические работы, выполненные более полувека на-
шд и ставшие основополагающими в развитии двух важней-
ших направлений в области повышения устойчивости и надеж-
ности работы энергетических систем — создании регуляторов
і u) !Г>уждения сильного действия синхронных генераторов и раз-
работки асинхронизированных синхронных машин.

В связи с этим нам показалось целесообразным переиз-
/III ь без каких-либо купюр и существенного редактирования
под одной обложкой две небольшие книжки М. М. Ботвинни-
ка «Регулирование возбуждения и статическая устойчивость
< ппхронных машин», ГЭИ, 1950 г., и «Асинхронизированная
і микронная машина», ГЭИ, 1960 г.

Мы сочли важным напомнить энергетической обществен-
ное і и историю указанных разработок и их значение в развитии
III стественной электроэнергетики.

Еще в довоенные годы М. М. Ботвинник, будучи аспиран-
і <>м Ленинградского политехнического института, начал иссле-

дования, посвященные повышению статической устойчивости синхронных генераторов путем регулирования возбуждения. В 1937 г. М. М. Ботвинник **успешно** защитил кандидатскую диссертацию, положившую практическое начало работам по проблемам повышения **устойчивости** синхронных генераторов. Начавшаяся Великая **Отечественная** война прервала его научную деятельность. Он вернулся к ней в первые послевоенные годы.

Особенную **актуальность** работы, посвященные повышению устойчивости синхронных генераторов, приобрели с началом сооружения в эти годы Волжской (тогда Куйбышевской) ГЭС и строительства линии шектروпередачи Волжская ГЭС - Москва.

В своей работе «**Регулирование** возбуждения и статическая устойчивость синхронной машины», опубликованной в 1950 г., М. М. Ботвинник исследовал устойчивость синхронной машины при **регулировании** возбуждения по отклонению угла δ (угол между ЭДС генератора и напряжением приемной системы) и его производным как параметра режима, непосредственно характеризующего устойчивость генератора. Материалы, изложенные в указанной работе, стали предметом докторской диссертации М. М. Ботвинника, защищенной в 1951 г.

Регулирование **возбуждения** по отклонению и производным какого-либо параметра режима было названо М. М. Ботвинником «**сильным регулированием**», а регуляторы, реализующие такой принцип регулирования, — регуляторами «**сильного действия**». Надо сказать, что этот термин не сразу был воспринят **энергетиками**, занимающимися вопросами устойчивости синхронных машин. Однако никто не смог предложить другой **термин**, который бы лучше характеризовал новый вид регулирования возбуждения.

Таким образом, термин «**сильное регулирование**» возбуждения, введенный М. М. Ботвинником, стал общепринятым.

Под руководством М. М. Ботвинника впервые был создан образец АРВ сильного действия, осуществлявший регулирование по углу δ электропередачи и его производным. Возникла

необходимость экспериментальной проверки нового принципа регулирования.

С этой целью были сооружены две полупромышленные модели с использованием турбогенераторов, установленных на ТЭЦ Всесоюзного теплотехнического института, и гидрогенераторов Карамышевской ГЭС канала им. Москвы. При этом двухцепная линия электропередачи 400 кВ длиной 1100 км моделировалась с помощью реакторов и батарей конденсаторов.

На этих установках в 1949-1951 гг. впервые были проведены испытания, показавшие принципиальную возможность работы генераторов в зоне искусственной устойчивости при сильном регулировании возбуждения. На модели, сооруженной на Карамышевской ГЭС, помимо этого, была проведена длительная опытная эксплуатация АРВ сильного действия в условиях нормальной работы генераторов ГЭС через «дальнюю линию электропередачи».

Таким образом, была полностью подтверждена высокая эффективность сильного регулирования возбуждения в повышении устойчивости синхронной машины при работе на дальние расстояния.

Теория сильного регулирования возбуждения, разработанная М. М. Ботвинником применительно к использованию в качестве сигнала угол δ и его производные, носила принципиальный характер. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные им, дали толчок к широкому развитию работ в этом направлении.

Конкретными разработками регуляторов возбуждения сильного действия занялся целый ряд научных, проектных, эксплуатационных организаций.

При практическом осуществлении принципа регулирования по углу возникли затруднения, связанные с необходимостью телепередачи на удаленную электростанцию вектора напряжения приемного конца линии. Поэтому как теоретические, так и экспериментальные исследования (последние проводились с использованием электродинамических моделей) были направлены на поиски альтернативных параметров режима,

регулирование возбуждения по которым могло бы дать существенный эффект в повышении устойчивости синхронных генераторов. При этом имелось в виду, что изменению угла S в переходных процессах соответствует пропорциональное изменение в определенных пределах тока или напряжения генератора.

Большое значение имели теоретические работы в области сильного регулирования возбуждения, проведенные в МЭИ. Там был разработан метод построения областей устойчивости при разных видах сильного регулирования и учета различных факторов. С помощью этого метода даже для весьма сложных систем удается выразим, в параметрической форме границу области устойчивости и, представив ее графически, установить ограничения в величинах коэффициентов регулирования.

В работах по созданию и внедрению регуляторов возбуждения сильного действия помимо НПИИЭ принимали участие ВЭИ, МЭИ, ЛОИАТ АН СССР (.....; ВНИИИЭлектромаш), ИАТ АН СССР, ИЭ АН УССР, ОРГРЭС, Волжские ГЭС, ОДУ ЕЭС (ныне ОАО «СО ЕЭС») и др.

В ВЭИ был создан макет $41*15$, содержащий универсальный измерительный элемент, позволяющий осуществлять регулирование возбуждения по любому из трех режимных параметров (напряжению, току, углу) и их производным в любой комбинации. Наличие такого универсального макета регулятора позволило при проведении исследований на электродинамической модели МЭИ в одинаковых условиях проверить различные виды регулирования и выбрать оптимальный.

На электродинамической модели МЭИ при моделировании электропередачи Волжская (Жигулевская) ГЭС—Москва в 1953 г. были проведены сравнительные испытания разработанных к тому времени различными организациями (ВНИИЭ, ВЭИ, ИЭ АН УССР, ИАТ АН СССР, МЭИ) макетов регуляторов сильного действия.

В результате сравнительных испытаний наиболее целесообразным в смысле надежности и эксплуатационных удобств (отсутствие необходимости телепередачи вектора напряжения

конца линии электропередачи) было признано регулирование по i и клонению тока и напряжения, первой и второй производным тока, первой производной напряжения, которое было реализовано в макете регулятора, разработанном в ВЭИ.

Этот регулятор после доработки до промышленного образца и был рекомендован к внедрению на Волжской ГЭС.

Регуляторы, действующие по току и его производным, разработанные и изготовленные в ВЭИ, были установлены на 18 гидрогенераторах Волжской ГЭС. Испытания устойчивости, проведенные на электропередаче Волжская ГЭС-Москва, подтвердили их высокую эффективность.

Однако исследования в области сильного регулирования продолжались.

При параллельной работе генераторов на общие шины регулирование возбуждения каждого из них необходимо производить по суммарному току или току линии. В этом случае несколько регуляторов получают сигнал от одного блока тока линии, что снижает надежность системы регулирования. Кроме того, при изменениях схемы первичной коммутации станции приходится переключать регуляторы для того, чтобы на вход каждого из них поступал сигнал от блока тока той линии, на которую работает данный генератор.

В Институте электромеханики АН СССР (ранее ЛОИАТ АН СССР, ныне ВНИИЭлектромаш) было предложено осуществлять сильное регулирование возбуждения по изменению частоты и ее первой производной, не имеющее указанных недостатков, присущих регулированию по току. Регуляторы, основанные на этом принципе, позволяют регулировать возбуждение по режимным параметрам каждого отдельного генератора. В то же время, регулирование по изменению частоты и ее первой производной адекватно регулированию по первой и второй производным угла δ .

Широкие исследования сильного регулирования по частоте⁴, проведенные на электродинамической модели Института электромеханики АН СССР, показали, что такой принцип регулирования в отношении повышения устойчивости дальних

электропередач не уступает принципу регулирования возбуждения по току.

Работы в области сильного регулирования возбуждения получили широчайшее внедрение в энергосистемах Советского Союза, явились одним из краеугольных камней создания Единой энергосистемы (ЕЭС) СССР, а ныне России, обеспечили успешное и, в целом, надежное функционирование ЕЭС в течение уже более 40 лет.

Существенно позже, чем в нашей стране, за рубежом также стали создаваться и развиваться системы регулирования возбуждения, аналогичные по своим свойствам и характеристикам системам сильного регулирования. В настоящее время оснащение синхронных генераторов системами регулирования возбуждения, **реагирующими не** только на отклонение тех или иных параметров, **но и на** их производные или сигналы, эквивалентные **производным**, получили распространение во всех электроэнергетических **системах** мира. Системы сильного регулирования возбуждения, предложенные впервые М.М. Ботвинником, **продолжают** успешно развиваться и совершенствоваться с использованием более совершенных измерительных средств и силовых устройств.

В 1950-е гг. проблемы развития электроэнергетики поставили перед учеными и специалистами новые задачи по обеспечению устойчивой работы электроэнергетических систем.

Сильное регулирование возбуждения позволило существенно расширить область устойчивости синхронных генераторов, однако зависимость их устойчивости от углового положения ротора сохранилась. А это означает, что объективно этой машине присуще ограничение по устойчивости.

Ботвинником была выдвинута идея создания такой электрической машины, которая сочетала бы положительные свойства синхронных и асинхронных машин. Как известно, устойчивость асинхронной машины лимитируется не углом, а ее скольжением.

Однако в асинхронной машине отсутствует регулирование возбуждения. Создание электрической машины, имеющей

регулирование возбуждения и обладающей устойчивостью по скольжению, — вот идея, которая была выдвинута М. М. Ботвинником. Такая машина была названа им асинхронизированной синхронной. В книге «Асинхронизированная синхронная машина», опубликованной в 1960 г., М. М. Ботвинником были изложены основы теории таких машин. Позже, в 1964 г., издательством «Пергамон Пресс» эта книга была издана на английском языке.

Справедливости ради необходимо отметить, что идеи со-здания подобного рода машин выдвигались еще в 1910—20-х гг. зарубежными, преимущественно немецкими, электротехниками при создании так называемых коллекторных каскадов. Однако стройная теория асинхронизированных синхронных машин, проблем регулирования их возбуждения была впервые разработана и предложена М. М. Ботвинником, который по праву считается основоположником создания таких электрических машин.

Идея асинхронизированных машин* состоит в том, что на роторе машины располагаются две взаимоперпендикулярные или три, сдвинутые относительно друг друга на 120 эл. град обмотки возбуждения, к которым подводятся напряжения от специального возбудителя. Система регулирования организована следующим образом. К обмоткам возбуждения подаются напряжения частоты скольжения. Асинхронизированная машина может работать и с синхронной скоростью вращения, но при этом устойчивость этой машины определяется не углом машины, а ее скольжением. Две или три обмотки на роторе, необязательно одинаковые и необязательно симметричного расположения, обеспечивают так называемое векторное регулирование, когда раздельно и независимо регулируются электромагнитный момент (активная мощность) и напряжение (реактивная мощность). Подобного рода регулирование, названное позже асинхронизированным способом регулирования в своей

*Далее мы будем пользоваться термином «асинхронизированные» машины вместо «асинхронизированные синхронные», который стал общепринятым.

принципиальной части, и было предложено М. М. Ботвинником.

Следует отметить, что на данный способ регулирования М. М. Ботвинником совместно с группой сотрудников ВНИИЭ был получен патент в США, Англии, Франции, Японии и, естественно, авторское свидетельство в СССР.

Интересно отметить, что принцип векторного регулирования в электрических машинах был запатентован фирмой «Сименс» на несколько месяцев позже.

Систематические работы в области теории и практики асинхронизированных машин были начаты под общим научным руководством М. М. Ботвинника примерно в 1955—1956 гг. во ВНИИЭ) в содружестве с другими организациями: ВНИИЭМ, ВЭИ, заводом «Электросила» и др. Несколько позже (с 1961 г.) во ВНИИЭ) по главе с М. М. Ботвинником была организована лаборатория ^асинхронизированных машин, ставшая «мозговым центром», где решались различные задачи, связанные с проблемами создания и применения в электроэнергетике этих машин.

Научная школа по асинхронизированным машинам в дальнейшем получила широкое развитие в СССР, были созданы исследовательские центры по асинхронизированным машинам в Ленинграде», Киеве, Харькове, Ереване и др.

Работы в области асинхронизированных машин развивались в части как генераторов, так и двигателей.

Впервые в мире усилиями ВНИИЭ, ВНИИЭМ, ВНИИ-Электромаш, заводов «Электросила» и «Уралэлектротяжмаш» были изготовлены в конце 1950-х гг. и в 1964-66 гг. внедрены в эксплуатацию два асинхронизированных гидрогенератора мощностью по 40 МВт на Иовской ГЭС Колэнерго. Пятью годами позже ВНИИЭ совместно с заводом «Электросила» для опытной Кислогубской приливной электростанции был изготовлен асинхронизированный гидрогенератор мощностью 400 кВт, позволяющий агрегату работать с переменной частотой вращения ротора в пределах $\pm 30\%$. Впервые на практике было показано, что при изменяющихся напорах воды за счет

работы с переменной частотой вращения можно достичь повышения КПД агрегата. На Кислогубской приливной электростанции это повышение составило 17%—21%.

Этот опыт послужил основой последующего разворота ра-
Пют в области применения асинхронизированных генераторов для ГАЭС и ветроэнергетических установок, о чем будет ска-
чано ниже.

Гидрогенераторы на Иовской ГЭС проработали 25 лет. Они послужили отличной экспериментальной базой, на кото-
рой отрабатывались различные системы возбуждения асинхро-
низированных машин: независимое и самовозбуждение, ионное и тиристорное. Были проведены многочисленные испытания асинхронизированных машин в статических и динамических режимах, подтвердившие их основные свойства. Были устранены заводские недостатки в конструкции машин, в системах возбуждения и регулирования, неизбежные при создании пер-
вых образцов новой техники. Результаты этих работ были в 1972 г. доложены на сессии СИГРЭ в Париже и вызвали у специалистов большой интерес.

Надо отметить, что приблизительно в 1950-60-х гг. в Англии фирмой «Парсонс» были начаты работы по созданию асинхронизированных машин, окончившиеся неудачей.

Как уже отмечалось, асинхронизированные машины и, в частности, генераторы могут работать в установившихся режимах не только с синхронной, но и со скоростью, отличающейся от синхронной. Для генераторов с массивным ротором, каковыми являются турбогенераторы, работа в установившихся режимах со скольжением не выгодна, ибо возникают большие потери в массиве ротора, Поэтому асинхронизированные турбогенераторы предназначаются для работы с синхронной частотой вращения ротора, обладая в отличие от синхронных, как указано выше, возможностью устойчивой работы независимо от углового положения ротора. Асинхронизированные же гидрогенераторы и электродвигатели, содержащие шихтованный ротор, способны и работают в номинальном режиме как с синхронной, так и с несинхронной частотой вращения ротора.

После успешных работ по созданию асинхронизированных гидрогенераторов Иовской ГЭС и Кислогубской ПЭС в СССР наступил перерыв, длившийся до 1980-х гг. Тогда же, начиная с конца 1970-х гг., японскими фирмами «Хитачи», «Мицубиси» и «Тошиба» были начаты массовое производство и масштабное внедрение асинхронизированных гидрогенераторов для ГАЭС. Единичные мощности асинхронизированных гидрогенераторов, освоенные японскими фирмами, составили от 80 до 360 МВт. Помимо повышения КПД в двигательных и генераторных режимах японскими специалистами на практике было доказано, что эти гидрогенераторы успешно решают проблему исключения гидроударов и кавитации, обладают существенно большим быстродействием по сравнению с синхронными.

Применение⁴ асинхронизированных гидрогенераторов-двигателей для ГЭС и ГАЭС, работающих с переменным напором, стало мировой тенденцией, которая развивается в настоящее время.

Так, в конце 1990-х гг. группой фирм («ЭЛИН», «Фойт», «АЕГ» и др.) для энергокомпании «Ватенфал» в Германии были введены в эксплуатацию два асинхронизированных гидрогенератора по 350 МВт каждый. Проявляют интерес к этим машинам энергокомпании Швейцарии, Франции, Испании, Индии и других стран.

В 2010 г. по инициативе ОАО «НТЦ электроэнергетики» (в состав которого вошел ВНИИЭ) ОАО «Гидропроект», ОАО НИИЭС, компанией ОАО «РусГидро» развернуты масштабные работы по изучению возможностей применения асинхронизированных генераторов для ГЭС и ГАЭС. В этой работе принимают участие ОАО «Силловые машины», проявляет интерес к сотрудничеству фирма «Альстом».

В 1970-80-х гг. в ряде зарубежных стран (Дания, Германия, США, Англия и др.) начали проводиться масштабные работы по созданию ветроагрегатов и ветростанций единичной мощностью 250-1000 кВт и более. Аналогично ГАЭС и ПЭС в ветроагрегатах работа с переменной час-

иной вращения обеспечивает повышение КПД установки, возможности генерировать электроэнергию при малых скоростях ветра (4 м/с), т.е. более полно использовать вет-
I»потенциал местности. Ведущими зарубежными производи-
иодителями электрооборудования «АББ» и «Сименс» были
иыполнены разработки и изготовлены в большом количе-
< i>ве асинхронизированные генераторы для ветроустановок,
ициничная мощность которых в настоящее время достигла
r. 8 МВт.

В настоящее время такими генераторами оснащаются
Польпинство мощных ветроустановок в мире. Как показала
практика, асинхронизированные генераторы для ветроустано-
иок позволяют помимо упомянутых преимуществ обеспечить
устойчивую и надежную передачу электроэнергии к потреби-
телям.

С 1980-82 гг. по инициативе ВНИИЭ были начаты разра-
ботки асинхронизированных турбогенераторов. Такая необхо-
димность была обусловлена следующими факторами.

Увеличилась неравномерность графиков нагрузки, обу-
словленной в определенной мере изменением технологических
процессов производства, переводов больших предприятий на
одно- и двухсменные режимы работы, возрастанием доли ком-
мунальных потребителей. Как следствие этого, возникли проб-
лемы потребления реактивной мощности в высоковольтных се-
тях 220-750 кВ и поддержания напряжения в сети на требуемом
уровне. Работа синхронных турбогенераторов в этих режимах
приводила к ускоренному износу из-за разрушения торцевых
юн активной стали статоров. Кроме того, как хорошо извест-
но из теории и практики, перевод синхронных генераторов в
режим потребления реактивной мощности чреват нарушением
условий статической и динамической устойчивости.

Вторым, не менее важным, фактором явилась пробле-
ма повышения пределов статической и динамической устойчи-
вости турбогенераторов при работе в так называемых слабых
сетях, а также при передаче электроэнергии на большие рас-
стояния.

Востребованность в асинхронизированных турбогенераторах оказалась объективно обоснованной, так как эти турбогенераторы, как было отмечено выше, способны успешно решать возникшие проблемы.

Учениками и последователями М. М. Ботвинника была развита теория асинхронизированных машин применительно к турбогенераторам. Был распространен принцип векторного регулирования (асинхронизированный принцип регулирования) на машины, **содержащие** массивный ротор с неравноценными и равноценными обмотками с произвольным угловым расположением относительно друг друга. Определенный вклад в эту теорию был внесен также коллективом ученых Института электродинамики Украинской Академии наук и Киевского **политехнического** института, **работающих** в тесном контакте с ВНИИШ.

Заводом «Электротяжмаш» (г. Харьков) были разработаны и изготовлены два **асинхронизированных** турбогенератора с водородно-водяным охлаждением мощностью 200 МВт, система регулирования которых была разработана и изготовлена совместно ВНИИЭ и ВЭИ, а система возбуждения произведена заводом «Уралэлектротяжмаш».

В 1985 г. состоялось успешное внедрение первого, а в 1990 г. — **второго** турбогенератора на Бурштынской ГРЭС (Львовэнерго). Промышленная эксплуатация подтвердила их заданные **проектом** свойства и характеристики: машины работают в режимах как выдачи, так и потребления реактивной мощности (± 120 850 Мвар) без повреждения торцевой зоны и нарушения устойчивости. До сих пор оба эти турбогенератора успешно эксплуатируются в энергосистеме Украины.

Результаты указанных выше работ были доложены на ряде международных конференций (СИГРЭ и др.), получили мировое признание, а СССР (и позже Россия) стал мировым лидером по производству асинхронизированных турбогенераторов.

Следующий этап развития асинхронизированных турбогенераторов начался с 2000 г. и продолжается по настоящее время. Начало этих работ связано с острейшей проблемой, воз-

пикшей в Московской энергосистеме в связи с необходимостью работы генераторов в широком диапазоне регулирования реактивной мощности от режимов выдачи до глубокого потребления.

Филиалом ОАО «Силовые машины» — заводом «Электросила» совместно с ВНИИЭ были разработаны асинхронизированные турбогенераторы мощностью 110-300 МВт с полностью воздушным и воздушно-водяным охлаждением. Чрезвычайно важно, что на заводе организовано серийное производство подобных турбогенераторов. Первый асинхронизированный турбогенератор мощностью 100 кВт был внедрен в 2003 г. на ТЭЦ № 22 Мосэнерго, еще три асинхронизированных турбогенератора мощностью 160 МВт были внедрены в течение 2007-2008 гг. в составе ПГУ-450 на ТЭЦ №21 и ТЭЦ №27 Мосэнерго. В 2009 г. на Каширской ГРЭС введен в эксплуатацию асинхронизированный турбогенератор мощностью 320 МВт. Подтверждена ведущая роль России, школы, созданной М. М. Ботвинником, в мировой электроэнергетике в области создания и применения асинхронизированных турбогенераторов.

Проблемами применения в электроэнергетике асинхронизированных машин интересуется ряд стран: США, Канада, Австралия. В последнее время возник интерес к этой проблеме в Польше. Публикуются в ряде зарубежных научно-технических журналах статьи, посвященные проблемам создания и применения асинхронизированных турбогенераторов.

Таким образом, можно констатировать, что идеи М. М. Ботвинника в области создания и применения в электроэнергетических системах асинхронизированных машин получили мировое распространение.

История разработки и создания асинхронизированных электроприводов не менее богата, чем история создания генераторов.

Асинхронизированный электропривод — это разновидность регулируемого электропривода переменного тока, содержащего ротор с трехфазной симметричной обмоткой, которая питается от преобразователя частоты, мощность которого

определяется скольжением машины. Асинхронизированный электропривод имеет два решающих преимущества, заключенных как в способности работать с частотами вращения ротора выше и ниже синхронных, что сказывается на экономии установленной мощности **преобразователя** частоты, так и в возможности регулирования **реактивной** мощности независимо от частоты вращения.

Стройная **теория** этих электроприводов, получившая практическое **подтверждение** на опытном образце мощностью 50 кВт, была **разработана** во ВНИИЭ под общим научным руководством М. М. Ботвинника в 1961-63 гг. Примерно этим же периодом **характеризуются** работы по асинхронизированным **электроприводам** за рубежом (фирмы «АББ», «Сименс», «Альстом» и др.), являющиеся развитием известных работ по коллекторным **каскадам переменного** тока. В СССР после проведения **масштабных испытаний** на заводе имени Владимира Ильича **асинхронизированного электропривода** мощностью 50 кВт было **организовано серийное производство** подобного рода электроприводом на заводе ХЭМЗ (г. Харьков, Украина). Около **10 комплектов электроприводов** единичной мощностью от 630 до 1600 кВт были **успешно** внедрены на дутьевых вентиляторах и дымососах ряда ТЭС (Минская ТЭЦ-4, Вильнюсская ТЭЦ-3, **Конаковская** ГРЭС, Змиевская ГРЭС и др.).

Наиболее интересной и перспективной стала совместная разработка **БШИ И'** ХЭМЗ-фирма «Элин» (Австрия) бесщеточного асинхронизированного электропривода мощностью 1600 кВт для **Минской ТЭЦ-4**. Советскими специалистами была разработана и изготовлена система регулирования машины и преобразователь частоты (циклоконвертер), а австрийскими специалистами — **бесщеточный** электродвигатель. Электропривод, не имеющий мировых аналогов, был успешно введен в эксплуатацию в 1978 г. и до сих пор надежно эксплуатируется. Министерствами энергетики и электропромышленности было принято решение об организации производства подобного рода электроприводов на заводе «Электромаш» (г. Тирасполь, Молдова). Были изготовлены и на той же Минской ТЭЦ-4

г.мсдрены еще два подобного рода электропривода мощностью 100 кВт отечественного производства. К сожалению, после Распада Советского Союза производство бесконтактных асинхронных электроприводов было на заводе прекращено.

Фирмами «АББ», «Сименс», «Альстом», упоминавшимися выше, было изготовлено и внедрено в различных отраслях экономики большое количество асинхронизированных электроприводов. Максимальная мощность таких электроприводов достигла 50-60 МВт.

В настоящее время в связи с развитием силовой электроники получили большое распространение электроприводы, содержащие преобразователи частоты в статорных контурах асинхронных машин с короткозамкнутым ротором и синхронных машин. Асинхронизированные электроприводы также имеют свою нишу. Это мощные и сверхмощные электроприводы с регулированием частоты вращения в ограниченных пределах, не превышающих $\pm 30\%$ от синхронной, а также ряд специальных устройств, например асинхронизированный компенсатор реактивной мощности.

В 1996 г. японской фирмой «Хитачи» был подготовлен и внедрен в электрическую сеть острова Окинава асинхронизированный компенсатор мощностью 60 Мвар. В своей схемотехнической части этот асинхронизированный компенсатор ничем не отличается от асинхронизированного электропривода. В отличие от традиционного синхронного компенсатора асинхронизированный способен регулировать реактивную мощность в пределах $\pm 100\%$ своей номинальной мощности без потери устойчивости, а канал регулирования активной мощности (частоты вращения) используется для стабилизации частоты в достаточно слабой энергосистеме острова Окинава. Удалось достичь требуемого качества поддержания частоты.

Свойство асинхронизированного компенсатора регулировать реактивную мощность в пределах $\pm 100\%$ в номинальном режиме и возможность кратковременной (до 60 с) двойной перегрузки по мощности послужило основой создания усилиями ОАО «НТЦ электроэнергетики» и ОАО «Силовые

машины» — «Электросила» двух асинхронизированных компенсаторов мощностью по 100 Мвар каждый для ПС 500 кВ Бескудниково в Московской энергосистеме. Эти компенсаторы в отличие от японских содержат массивный ротор. Поэтому они предназначены для работы в нормальном режиме с синхронной частотой вращения. Ввод этих компенсаторов намечен на 2011 г.

Будущее асинхронизированных машины связано с проблемами создания так называемой интеллектуальной энергосистемы, в которой к электрооборудованию предъявляются повышенные требования в отношении управляемости и устойчивости, что, как уже неоднократно описывалось выше, свойственно асинхронизированным машинам.

Михаил Моисеевич Ботвинник являлся основоположником разработки систем сильного регулирования возбуждения синхронных машин и создания асинхронизированных машин. И если сильное регулирование — это сегодняшний день электроэнергетики, то асинхронизированные машины — это сегодняшний и, в большей степени, завтрашний день.

Таков выдающийся вклад М. М. Ботвинника в электроэнергетику.

*Э. Л. Бронштейн
Ю. Г. Шакарян*