

Из истории электротехники

Юбилей ученого-электроэнергетика и выдающегося шахматиста

(К 100-летию со дня рождения М.М. Ботвинника)

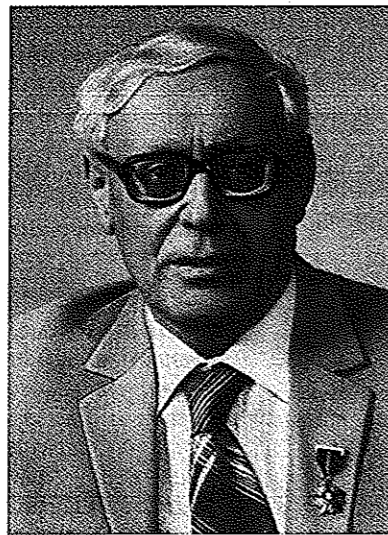
В августе с.г. исполнилось 100 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки РФ, шестого чемпиона мира по шахматам Михаила Моисеевича Ботвинника. В его жизни удачно сочетались два направления деятельности — шахматиста высочайшего класса и профессионала-электроэнергетика; и в том и в другом Михаил Моисеевич достиг выдающихся успехов.

Деятельность М.М. Ботвинника как ученого-электроэнергетика характеризуется стремлением к поиску нового, прогрессивного. Ярким подтверждением этого являются его теоретические работы, выполненные более полувека назад и ставшие основополагающими в развитии двух важнейших направлений в области повышения устойчивости и надежности энергетических систем — создании регуляторов возбуждения сильного действия синхронных генераторов и разработках асинхронизированных синхронных машин.

В дни юбилея ученого представляется важным напомнить научной общественности историю указанных разработок и их значение для развития отечественной электроэнергетики.

Еще в довоенные годы М.М. Ботвинник, в то время аспирант Ленинградского политехнического института, начал исследования с целью повышения статической устойчивости синхронных генераторов путем регулирования возбуждения. В 1937 г. он успешно защитил кандидатскую диссертацию, результаты которой послужили толчком к началу работ по практическому решению проблемы повышения устойчивости синхронных генераторов. Начавшаяся война прервала его научную деятельность.

В первые послевоенные годы исследования Михаила Моисеевича приобрели особенную актуальность в связи с началом сооружения Волжской (тогда Куйбышевской) ГЭС и строительства линии электропередачи 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 (между ЭДС генератора и напряжением приемной системы) и его производным — как параметра режима, непосредственно характеризующего устойчивость генератора. Материалы указанной работы легли в основу докторской диссертации М.М. Ботвинника, защищенной в 1951 г.

Регулирование возбуждения по отклонению какого-либо параметра режима и его производным было названо М.М. Ботвинником «сильным регулированием», а регуляторы, реализующие такой принцип регулирования, — регуляторами «сильного действия». Эти термины стали общепринятыми.

Под руководством М.М. Ботвинника впервые был создан образец автоматического регулятора возбуждения (АРВ) сильного действия, осуществлявший регулирование по углу 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. Впервые проведенные на этих установках в 1949–1951 гг. испытания показали принципиальную возможность работы генераторов в зоне искусственной устойчивости при сильном регулировании возбуждения. На модели, сооруженной на Карамышевской ГЭС, была также проведена длительная опытная эксплуатация АРВ сильного действия в условиях нормальной работы генераторов ГЭС через «дальнюю линию электропередачи». Таким образом, была полностью подтверждена высокая эффективность применения сильного регулирования возбуждения для повышения устойчивости синхронной машины при работе на дальние расстояния.

Теория сильного регулирования возбуждения, разработанная М.М. Ботвинником применительно к использованию в качестве сигнала «угол и его производные», имела принципиальный характер. Теоретические и экспериментальные исследования ученого способствовали широкому развитию работ в этом направлении. Конкретными разработками регуляторов возбуждения сильного действия занялся целый ряд научных, проектных, эксплуатационных организаций. При этом возникли затруднения, связанные с необходимостью телепередачи на удаленную электростанцию значения вектора напряжения приемного конца линии. Поэтому как теоретические, так и экспериментальные исследования (последние проводились с использованием электродинамических моделей) были направлены на поиск альтернативных параметров режима, регулирование возбуждения по которым могло бы дать существенный эффект в повышении устойчивости синхронных генераторов. Имелось в виду, что изменению угла 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 Московском энергетическом институте. Был разработан метод построения областей устойчивости при разных способах сильного регулирования и учета различных факторов. С помощью этого метода даже для весьма сложных систем удается выразить в параметрической форме границу области устойчивости и, представив ее графически, установить ограничения в значениях коэффициентов регулирования.

В работах по созданию и внедрению регуляторов возбуждения сильного действия помимо ВНИИЭ, в котором трудился М.М. Ботвинник, принимали участие многочисленные организации. В ВЭИ был создан макет АРВ, содержащий универсальный измерительный элемент и позволяющий регулировать возбуждение по любому из трех режимных параметров (напряжению, току, углу) и их производным в любой комбинации. Создание такого универсального макета регулятора позволяло при проведении исследований на электродинамической модели МЭИ в одинаковых условиях проверить различные виды регулирования и выбрать оптимальный. При моделировании электропередачи Волжская (Жигулевская) ГЭС—Москва в 1953 г. были проведены сравнительные испытания разработанных к тому времени ВНИИЭ, ВЭИ, ИЭ АН УССР, ИАТ АН СССР, МЭИ макетов регуляторов сильного действия. Наиболее целесообразным в смысле надежности и эксплуатационных удобств (отсутствии необходимости телепередачи вектора

напряжения конца линии электропередачи) было признано регулирование по отклонению тока и напряжения, первой и второй производными тока, первой производной напряжения, которое было реализовано в макете регулятора, разработанном в ВЭИ. После доработки до промышленного образца этот регулятор 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 подтвердили их высокую эффективность. Однако исследования в области сильного регулирования продолжались.

При параллельной работе генераторов на общие шины регулировать возбуждение каждого из них необходимо 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 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. Исследования сильного регулирования по частоте, 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.

Сильное регулирование возбуждения широко внедрялось в энергосистемах Советского Союза, явилось одним из краеугольных камней создания Единой энергосистемы (ЕЭС) СССР, а ныне России, обеспечило 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 регули-

рования 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 с использованием более совершенных измерительных средств и силовых устройств.

В 50-е годы прошлого столетия ученым и специалистам пришлось решать новые задачи по обеспечению устойчивой работы электроэнергетических систем. Сильное регулирование возбуждения позволило существенно расширить область устойчивости синхронных генераторов, однако зависимость их устойчивой работы от углового положения ротора сохранилась. Это означало, что объективно машине присущи ограничения по устойчивости. М.М. 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 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», изданной в 1960 г., М.М. Ботвинник изложил основы теории таких машин. В 1964 г. издательством «Пергамон Пресс» эта книга была издана на английском языке.

Справедливости ради необходимо отметить, что идеи создания подобного рода машин выдвигались еще в начале прошлого столетия зарубежными, преимущественно немецкими, электротехниками для так называемых коллекторных каскадов. Однако стройная теория асинхронизированных синхронных машин, регулирования возбуждения была впервые разработана и предложена М.М. Ботвинником, который по праву считается основоположником их создания.

Идея асинхронизированных машин¹ состоит в том, что на роторе располагаются две взаимоперпендикулярные или три, сдвинутые относительно друг друга на 120° обмотки возбуждения, к которым подводится напряжение от специального возбуждателя. Система регулирования организована

следующим образом. На обмотки возбуждения подается напряжение частоты скольжения. Асинхронизированная машина может работать и с синхронной частотой вращения, но при этом устойчивость ее определяется не углом δ , а скольжением. Две или три обмотки на роторе (необязательно одинаковые и 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 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 теоретические и практические исследования асинхронизированных машин были начаты под общим научным руководством М.М. Ботвинника примерно в середине 1950-х годов во ВНИИЭ в содружестве с другими организациями (ВНИИЭМ, ВЭИ, заводом «Электросила» и др.). Несколько позже во ВНИИЭ под руководством М.М. Ботвинника была организована лаборатория асинхронизированных машин, ставшая «мозговым центром» для решения задач, связанных с проблемами создания и применения этих машин в электроэнергетике. Соответствующие исследовательские центры были созданы в Ленинграде, Киеве, Харькове, Ереване и др.

Впервые в мире усилиями ВНИИЭ, ВНИИЭМ, ВНИИЭлектромаш, заводов «Электросила» и «Уралэлектротяжмаш» в конце 50-х годов прошлого столетия были изготовлены, а в 1964–1966 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, позволивший агрегату работать с переменной частотой вращения ротора в пределах $\pm 30\%$. Впервые на практике было показано, что при изменяющемся напоре воды за счет работы с переменной частотой вращения можно достичь повышения КПД агрегата. На Кислогубской приливной электростанции это повышение составило 17–21%.

¹Далее используется термин «асинхронизированные» машины вместо «асинхронизированные синхронные», ставший общепринятым.

Положительный практический опыт позволил развернуть работы по применению асинхронизированных генераторов на ГАЭС и ветроэнергетических установках (ВЭС), о чем будет сказано ниже.

Гидрогенераторы на Иовской ГЭС проработали 25 лет. Они послужили отличной экспериментальной базой для отработки различных систем возбуждения асинхронизированных машин — независимо и самовозбуждения, ионного и тиристорного. Были проведены многочисленные испытания асинхронизированных машин в статических и динамических режимах, подтвердившие их основные свойства, устранены заводские недостатки в конструкции машин, в системах возбуждения и регулирования, неизбежные при создании образцов новой техники. Результаты этих работ были в 1972 г. доложены на сессии СИГРЭ в Париже и вызвали большой интерес специалистов.

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

Как уже отмечалось, асинхронизированные машины, в частности генераторы, могут работать в установившихся режимах не только с синхронной скоростью, но и с отличающейся от нее. Для генераторов с массивным ротором, каковыми являются турбогенераторы, работа в установившихся режимах со скольжением невыгодна из-за больших потерь в массиве ротора. Поэтому асинхронизированные турбогенераторы предназначаются для работы с синхронной частотой вращения ротора, обладая при этом возможностью, как указано выше, устойчивой работы независимо от углового положения ротора. Асинхронизированные же гидрогенераторы и электродвигатели, имеющие шихтованный ротор, способны работать в номинальном режиме как с синхронной, так и с несинхронной частотой вращения ротора.

В конце 1970-х годов японскими фирмами «Хитачи», «Мицубиси» и «Тошиба» было начато массовое производство и масштабное внедрение асинхронизированных гидрогенераторов для ГАЭС. Единичные мощности машин, освоенные японскими фирмами, составили от 80 до 360 МВт. Помимо достигнутого повышения КПД в двигательных и генераторных режимах японскими специалистами на практике было доказано, что с применением асинхронизированных гидрогенераторов успешно решается проблема исключения гидроударов и кавитации, они обладают существенно лучшим быстроедействием по сравнению с синхронными.

Внедрение асинхронизированных гидрогенераторов/двигателей на ГЭС и ГАЭС, работающих с

переменным напором, стало мировой тенденцией, которая развивается в настоящее время.

В конце 1990-х годов 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 «Силовые машины», проявляет интерес к сотрудничеству фирма «Альстом».

В 1970–80-х годах в ряде зарубежных стран (Дания, Германия, США, Англия и др.) начались масштабные работы по созданию ветроагрегатов и ветростанций (ВЭС) единичной мощностью 250–1000 кВт и более. По аналогии с ГАЭС и ПЭС в ветроагрегатах работа с переменной частотой вращения обеспечивает повышение КПД установки, создает возможность генерировать электроэнергию при малых скоростях ветра (4 м/с), т.е. более полно использовать ветропотенциал местности. Ведущими зарубежными производителями электрооборудования «АББ» и «Сименс» были разработаны и изготовлены асинхронизированные генераторы для ветроустановок, единичная мощность которых достигла 8 МВт. Как показала практика, асинхронизированные генераторы для ветроустановок позволяют, помимо упомянутых преимуществ, обеспечить устойчивую и надежную передачу электроэнергии к потребителям.

С 1980–1982 гг. по инициативе ВНИИЭ была начата разработка асинхронизированных турбогенераторов. Необходимость в этом обуславливалась следующими факторами. Увеличение неравномерности графиков нагрузки в определенной мере было вызвано изменением технологических процессов производства, переводом крупных предприятий на одно- и двухсменные режимы работы, возрастанием доли коммунальных потребителей. Как следствие возникли проблемы потребления реактивной мощности в высоковольтных сетях 220–750 кВ и поддержания напряжения сети на требуемом уровне. Работа синхронных турбогенераторов в этих режимах приводила к ускоренному износу активной стали статоров из-за разрушения торцевых зон. Кроме того, как хорошо известно из теории и практики, перевод синхронных генераторов в режим потребления реактивной мощности чреват

нарушением условий статической и динамической устойчивости.

Другой, не менее важный, фактор — проблема повышения пределов статической и динамической устойчивости турбогенераторов при работе в так называемых слабых сетях, а также при передаче электроэнергии на большие расстояния.

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

Учениками и последователями М.М. Ботвинника была развита теория асинхронизированных машин применительно к турбогенераторам. Принцип векторного регулирования (асинхронизированный принцип регулирования) был распространен на машины с массивным ротором с неравноценными и равноценными обмотками при их произвольном угловом расположении относительно друг друга. Определенный вклад в эту теорию был внесен коллективом ученых Института электродинамики Украинской академии наук и Киевского политехнического института, работавших в тесном контакте с ВНИИЭ.

Заводом «Электротяжмаш» (г. Харьков) были разработаны и изготовлены два асинхронизированных турбогенератора с водородно-водяным охлаждением мощностью 200 МВт, система регулирования которых была спроектирована и изготовлена совместно ВНИИЭ и ВЭИ, а система возбуждения выполнена заводом «Уралэлектротяжмаш». Промышленная эксплуатация турбогенераторов на Бурштынской ГРЭС (Львовэнерго) подтвердила их заданные проектом свойства и характеристики, до сих пор они успешно работают в энергосистеме Украины. Об этих исследованиях, подтвержденных практикой эксплуатации, было доложено на ряде международных конференций; они получили мировое признание, а СССР и позже Россия стали мировым лидером в производстве асинхронизированных турбогенераторов.

Новый этап в развитии асинхронизированных турбогенераторов, начавшийся в 2000 г., был связан с острой проблемой, возникшей в Московской энергосистеме, — необходимостью работы генераторов в широком диапазоне регулирования реактивной мощности.

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 этих машин. Первый асинхронизированный турбогенератор мощностью 110 кВт был вне-

дрен в 2003 г. на ТЭЦ №22 Мосэнерго, еще три мощностью 160 МВт в 2007–2008 гг. в составе ПГУ-450 — на ТЭЦ №21 и №27 Мосэнерго. В 2009 г. на Каширской ГРЭС введен в эксплуатацию асинхронизированный турбогенератор мощностью 320 МВт. Подтверждена ведущая роль отечественной школы, созданной М.М. Ботвинником, в области создания и применения асинхронизированных турбогенераторов.

Интерес к рассматриваемой проблеме специалистов ряда ведущих стран мира говорит о том, что идеи М.М. Ботвинника в области создания и применения асинхронизированных машин получили мировое распространение.

Обратимся к еще одному важному направлению деятельности М.М. Ботвинника — разработке и созданию асинхронизированных электроприводов.

Асинхронизированный электропривод — разновидность регулируемого электропривода переменного тока. Ротор с трехфазной симметричной обмоткой питается от преобразователя частоты, мощность которого определяется скольжением машины. Асинхронизированный электропривод имеет два решающих преимущества: способность работать с частотами вращения ротора выше и ниже синхронных, что сказывается на экономии установленной мощности преобразователя частоты, и возможность регулирования реактивной мощности независимо от частоты вращения.

Стройная теория этих электроприводов, получившая практическое подтверждение на опытных образцах мощностью 50 кВт, была разработана во ВНИИЭ под общим научным руководством М.М. Ботвинника в 1961–63 гг. После проведения масштабных испытаний на заводе им. Владимира Ильича асинхронизированного электропривода мощностью 50 кВт было организовано серийное производство таких электроприводов на заводе ХЭМЗ (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 ВНИИЭ — ХЭМЗ — фирма «Ээлин» (Австрия) — бесщеточного асинхронизированного электропривода мощностью 1600 кВт для Минской ТЭЦ-4. Советскими специалистами были изготовлены система регулирования машины и преобразователь частоты (циклоконвертер), а австрийскими — бесщеточный электродвигатель. Электропривод, не имеющий мировых аналогов, был успешно введен в эксплуатацию в 1978 г. и до сих пор надежно эксплуатируется. Руководством отрас-

ли было принято решение об организации производства подобного рода электропривода на заводе «Электромаш» (г. Тирасполь, Молдова). На той же Минской ТЭЦ-4 были внедрены еще два электропривода мощностью 1600 кВт отечественного производства. К сожалению, после распада Советского Союза производство бесщеточных асинхронизированных электроприводов на заводе было прекращено.

Асинхронизированные электроприводы в большом количестве были внедрены фирмами «АББ», «Сименс», «Альстом» в различных отраслях промышленности. Максимальная мощность таких электроприводов достигала 60 МВт.

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

В 1996 г. японской фирмой «Хитачи» был включен в электрическую сеть о. Окинава асинхронизированный компенсатор мощностью 60 МВА, в достаточной слабой энергосистеме о. 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 обусловили создание усилиями ОАО «НТЦ электроэнергетики» и ОАО «Силовые машины» — «Электросила» двух асинхронизированных компенсаторов мощностью по 100 МВА каждый для ПС 500 кВ Бескудниково в Московской энергосистеме. В отличие от японских компенсаторы имеют массивный ротор, поэтому предназначены для работы в нормальном режиме с синхронной частотой вращения. Ввод компенсаторов в эксплуатацию намечен на 2011 г.

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

Кратко рассмотренная в этой юбилейной статье научная деятельность Михаила Моисеевича Ботвинника, основоположника разработки систем сильного регулирования возбуждения синхронных машин и создания асинхронизированных машин, имела важное значение для развития отечественной электроэнергетики, формирования Единой энергосистемы страны.

* * *

Поздравление

В августе с.г. исполнилось 70 лет Леониду Самуиловичу Слуцкину, генеральному директору издательства «Знак», выпускнику Московского энергетического института, кандидату технических наук. В середине 90-х годов, когда Энергоатомиздат фактически прекращал свою деятельность, коллективы редакций журналов «Электричество», «Электротехника» и «Светотехника» перешли в организованное Л.С. Слуцкиным предприятие (ЗАО «Фирма Знак»), ставшее их издателем. Успешная работа журналов в течение последних 15 лет — несомненная заслуга руководителя их издательской деятельности Леонида Самуиловича Слуцкого.

Желаем Леониду Самуиловичу здоровья и успешной плодотворной работы по изданию научно-технической литературы, в том числе старейшего российского журнала «Электричество».