

ИМЕНА И ДАТЫ

Л. А. Кощеев

История создания ЦСПА

Все начиналось еще в 1960-е. Это было время бурного развития электроэнергетики СССР. Причем, если можно так выразиться, развитие шло крупными блоками – мощные ТЭС и ГЭС, линии электропередачи 500 и 330 кВ, а впереди уже маячили атомные электростанции и еще более высокий класс напряжения линий электропередачи. Вместе с тем создавались и крупнейшие промышленные предприятия, росли города. Неудивительно, что в разных частях страны возникали проблемы с балансированием мощностей, а в целом намечалась и в последующем реализовалась проблема балансирования энергии. Не секрет, что приходилось нередко вести режим ЕЭС с частотой ниже 50 Гц с предельной загрузкой высоковольтной сети и сопутствующей опасностью нарушения устойчивости энергосистемы. Это послужило толчком к развитию и повсеместному внедрению противоаварийной автоматики (ПА).

Лаборатории электрических систем (ЛЭС) НИИПТ в 1960-е и последующие годы во все большем объеме поручались работы, связанные с определением комплекса средств ПА для энергосистем, включая ОЭС и ЕЭС, на разных уровнях их развития. Эти работы часто выполнялись по заказу и с участием сотрудников Энергосетьпроекта (ЭСП) и его региональных отделений.

Работы проводились с использованием электродинамической модели (ЭДМ) в две, а иногда и в три смены. Появление в ЛЭС вычислительного центра на базе ЭВМ «Минск 14» не снизило загрузку ЭДМ, а лишь увеличило объем работ. Накопившийся к середине 1970-х опыт исследований конкретных энергосистем показал, что напряженность стационарных режимов при недостаточных резервах генерации и пропускной способности связей существенно затрудняет организацию ПА. Подчас даже не очень значительный небаланс в одной части энергосистемы мог привести к опасной перегрузке и до того загруженных связей в другой части. Было очевидно, что управление генерацией в аварийных ситуациях недостаточно эффективно, а иногда и служит причиной дальнейшего развития аварийного процесса. Дело несколько упростилось после того, как в начале 1970-х была «узаконена» САОН (система автоматического отключения нагрузки), которая вначале называлась «специальная автоматика отключения нагрузки», чем подчеркивались ограничения в ее использовании. Но, особенно с появлением сложных кольцевых структур системообразующей сети, отключение нагрузки (ОН) средствами ПА использовалось все более широко, и в конце концов стало практически главным управляющим воздействием (УВ) противоаварийной автоматики для предотвращения нарушения устойчивости энергосистемы. Использование ОН наряду с автоматической частотной разгрузкой (АЧР) вызывало естественное недовольство руководителей промышленных предприятий и городов. Объем АЧР и особенно ОН приходилось иногда согласовывать в руководящих партийных органах. Претензии подкреплялись и расчетами переходных процессов «пост-фактум», которые показывали, что во многих аварийных ситуациях можно было обойтись гораздо меньшим объемом отключения нагрузки, или вообще ее

не отключать. Но для точной дозировки ПА необходимо было по крайней мере учесть реальную загрузку электростанций и линий электропередачи, подчас удаленных от места аварийного возмущения, а также вид аварийного возмущения, возможные действия других устройств и т. д., а в заключение, используя все эти данные, оценить устойчивость аварийного перехода и выбрать необходимый минимум УВ. К концу 1960-х определенного успеха удалось достигнуть в области развития средств телепередачи. Появились и неплохие программы для расчета переходных процессов и устойчивости. Однако использовать все это для определения УВ в сложной энергосистеме в темпе развития аварийного процесса было невозможно. Но и отказаться от использования в контуре управления быстро прогрессирующей вычислительной техники тоже было неразумно. Напрашивалась необходимость поиска разумного сочетания использования ее в предварительных расчетах и расчетах в темпе процесса изменения режима энергосистемы.

Для характеристики последовательности решения с использованием ЭВМ при определении УВ для предотвращения нарушения устойчивости в то время использовались условные символические обозначения [1]:

- I ДО – выбор УВ в текущем (предавварийном) режиме для каждого из расчетных аварийных возмущений и реализация УВ по факту идентификации возмущения;
- II ДО – предварительный расчет и запоминание УВ в виде многомерной области для всех предполагаемых схемно-режимных ситуаций и расчетных аварийных возмущений с реализацией УВ по факту идентификации предаварийного режима и аварийного возмущения;
- «После» – выбор и реализация УВ непосредственно после возникновения аварийного возмущения.

Согласно принципу «После» действуют локальные устройства ПА, в которых УВ определяются и реализуются по факту аварийного возмущения в соответствии с уставками, иногда в виде заранее определенной функциональной зависимости от режима и (или) возмущения.

При использовании принципа I ДО главная трудность заключается в необходимости провести в текущем режиме оценку устойчивости и выбрать УВ для всех расчетных возмущений в течение нескольких секунд, максимум минут, имея в виду обычную скорость изменения текущего режима энергосистемы. При технических средствах того времени эта задача большинству специалистов представлялась практически нерешаемой. ЭСП, как головная организация по проектированию энергосистем, отказался от использования I ДО при создании централизованной ПА на базе ЭВМ и приступил к разработке системы ПА с использованием принципа II ДО, предлагая НИИПТУ присоединиться к этой работе. Однако с первых шагов мы поняли ограниченную перспективу использования этой разработки в случае ее успешного завершения: необходимость выполнения огромного объема предварительных расчетов, которые придется повторять при изменении в результате развития схемы энергосистемы, что в конечном счете ограничит область использования крупным энергоузлом с примыкающими к нему линиями электропередачи. Мы же замахивались на энергосистему, в пределе на целую ОЭС, и в свою очередь предложили ЭСП совместно двинуться в этом направлении. Отказ был весьма категоричен – ЭСП не может заниматься авантюриными проектами. В шутку Б.И. Иофьев, в то время

руководитель отдела противоаварийной автоматики ЭСП, обещал в случае успеха выдвинуть нас на Нобелевскую премию.

Был еще один пункт принципиального расхождения с ЭСП, который принял решение разработать для централизованной ПА специализированную ЭВМ. Мы же считали необходимым ориентироваться на стандартную вычислительную технику, полагаясь на быстрый прогресс в ее развитии. В то же время мы понимали, что решать задачу устойчивости и выбора необходимых УВ в сложной энергосистеме на основе использования имевшихся на тот момент расчетных средств и известных программ практически невозможно. Тем не менее в НИИПТ практически постоянно проводились работы по совершенствованию ПА с использованием ЭВМ, в частности для ОЭС Урала. В этих работах, в основном базирующихся на принципе П ДО, при выборе и дозировке УВ использовались те или иные элементы I ДО [2]. Однако все это были примеривания к ЦСПА, а нужен был решительный шаг в сторону I ДО, и мы перебирали спонтанно возникающие, подчас заведомо нереализуемые предложения по преодолению этих трудностей. И вот счастливый случай. Мы с Ю. Д. Садовским в течение двух недель в декабре 1977 г. были в командировке в Праге. Цель поездки не требовала больших затрат времени. К тому же почти все время стояла мерзкая погода. Мы оба были не первый раз в Праге и не были любителями пива. В результате мы основную часть времени провели в гостинице и вели непрерывные обсуждения вариантов решения все той же задачи радикального ускорения оценки устойчивости сложной энергосистемы.

Здесь уместно сказать, что оба мы все предыдущие годы работали на электродинамической модели, пропустили через свои руки множество энергосистем, бесчисленное количество режимов и переходных процессов, в результате обладали недюжинной «режимной интуицией».

Мы исчертили целую пачку бумаги и к концу командировки сформулировали основную идею разделения энергосистемы на определенным образом организованные звездообразные эквиваленты, с уверенностью (на основании «режимной интуиции») в том, что при обеспечении устойчивости во всех звездообразных эквивалентах обеспечивается устойчивость энергосистемы. При этом была надежда и даже уверенность в том, что удастся найти формульный метод для быстрой оценки устойчивости в звездообразных эквивалентах.

По возвращении в Ленинград мы подключили к делу группу молодых сотрудников, владеющих, в отличие от нас с Садовским, искусством программирования. Прежде всего необходимо было убедиться в достоверности гипотезы о возможности оценки устойчивости сложной энергосистемы по результатам оценки устойчивости звездообразных эквивалентов. Теоретически сделать это было невозможно, поэтому для подтверждения предполагалось предъявить результаты практических расчетов для ряда энергосистем различной конфигурации при широком варьировании режимов. При этом предполагалось, что по ходу работы будет формализоваться регулярный метод определения звездообразных эквивалентов, хотя бы предварительные соображения о формульной оценке устойчивости звездообразного эквивалента и прочие заделы для будущего программного комплекса ЦСПА.

Необходимо заметить, что эта работа проводилась энтузиастами вне тематического плана лаборатории. Как только стали вырисовываться контуры приемлемого

решения, стала очевидной необходимость официально ввести работу в темплан, и это была непростая задача.

Прежде всего необходимо было найти объект для приложения нашей идеи. Трудно было рассчитывать на включение в план поисковой работы по исследованию возможности использования принципа I ДО при организации ПА сложной энергосистемы. Приходилось рисковать, обещая практическую реализацию в одной из энергосистем. Рассчитывать на поддержку ЭСП не приходилось. Решено было в качестве объекта определить ОЭС Северо-Запада. Кроме преимуществ территориальной близости была надежда привлечь на свою сторону начальника ОДУ Северо-Запада Е. И. Петряева и руководителя отдела релейной защиты и противоаварийной автоматики Северо-Западного отделения ЭСП (СЗО ЭСП) М. А. Горева (сына А. А. Горева). Все удалось сделать даже без особых усилий – это были по-настоящему прогрессивные руководители. Удалось найти сторонников и в ЦДУ ЕЭС СССР. Активно поддерживал наши поиски В. А. Семенов, тогда начальник службы защиты и противоаварийной автоматики ЦДУ, интерес к ним проявляли А. А. Окин, А. Ф. Бондаренко. При такой поддержке Главное техническое управление Минэнерго СССР (К. М. Антипов) согласилось на включение в темплан НИИПТ этой весьма проблематичной темы.

Дело закрутилось, но ненадолго. В 1982 г. Е. И. Петряев стал начальником ЦДУ, а новое руководство ОДУ Северо-Запада с первых шагов выявило свое нежелание быть причастным к нашей работе (обычные требования доказательств экономической эффективности, безусловной гарантии успеха в ближайшее время и т. д.). При этом уже был выполнен значительный объем работы по обоснованию алгоритма ЦСПА. Результаты этой работы были опубликованы в [2], а также ряде статей в Специальном выпуске трудов НИИПТ «Противоаварийное управление и регулирование энергосистем», Энергоатомиздат 1982.

И тут в НИИПТе появился главный диспетчер ОДУ Урала Е. А. Мошкин. Ему не составило большого труда уговорить нас переключиться на Урал. Нужно было еще официально оформить изменение объекта внедрения, но при поддержке Е. И. Петряева это уже было делом техники.

Замена ОЭС Северо-Запада на ОЭС Урала имела судьбоносное значение. Как теперь представляется, без этого мы вряд ли смогли бы реализовать нашу идею в отведенные для НИР сроки, а возможно, не осуществили бы вообще. При смене ОЭС мы лишались СЗО ЭСП в качестве соисполнителя, а попытки привлечь Уральское отделение ЭСП оказались безрезультатными, и все последующие работы шли без участия ЭСП.

Сотрудники ОДУ Урала подключились к проверке правомерности оценки устойчивости при разделении энергосистемы на звездообразные эквиваленты. Объединенными усилиями убедили, по крайней мере самих себя, в правомерности идеи. При расчетах обнаруживались и исключения, но они были из разряда подтверждающих основное правило.

К этому времени уже было ясно, что при доступном уровне техники того времени выбор УВ для обеспечения устойчивости возможен только по условиям статической устойчивости, без учета динамики аварийного процесса. С этой точки зрения

переключение на ОЭС Урала также было весьма уместно. В ранее выполненных работах ЛЭС НИИПТ было показано, что для кольцевой схемы ОЭС Урала решение задачи устойчивости при аварийных отключениях энергоблоков и ВЛ, образующих кольцевую сеть, сводится в основном к обеспечению статической устойчивости в послеаварийных режимах, при этом определена значимость выявления и введено само понятие «опасного сечения» [3].

Задача предотвращения нарушения статической устойчивости в послеаварийных режимах и возлагалась на ЦСПА. Что касается предотвращения нарушения динамической устойчивости генераторов в первой фазе аварийного процесса, то эта задача более или менее успешно могла быть решена действием локальных устройств ПА и систем регулирования. Конечно, это было еще одним допущением, базирующемся на опыте исследований на ЭДМ энергосистем различной конфигурации.

ОЭС Урала более, чем какая-либо другая, нуждалась в централизованном противоаварийном управлении в силу конфигурации системообразующей сети и высокой загруженности связей. Практически каждое аварийное отключение одной из ВЛ системообразующей сети приводило к необходимости отключения действием ПА промышленной нагрузки Урала. Поэтому на нашу работу, несмотря на кажущуюся ее авантюристность, смотрели с надеждой. Главную надежду на успех давало отношение к этому делу команды ОДУ Урала во главе с Е. А. Мошкиным (А. Т. Демчук, Е. Б. Короткин, Р. В. Двинских, А. М. Слодарж, Ю. В. Масайлов, Б. И. Аюев, Н. В. Блинков, В. Ф. Чесноков и другие). Они взяли на себя решение многих сопутствующих проблем, в том числе многие организационно-технические вопросы, весь комплекс вопросов информационной поддержки ЦСПА, наконец, программирование наших алгоритмических решений в машинном коде для максимального сокращения расчетного времени оценки устойчивости и выбора УВ, а также обеспечения надежности работы вычислительного комплекса в контуре управления. При воспроизведении режима энергосистемы по данным измерений использовалась программа оценивания состояния, разработанная В.Л. Прихно. По результатам совместных обсуждений появлялись и предложения по совершенствованию алгоритма и расчетных методик.

Разработка алгоритма ЦСПА постепенно разделилась между несколькими небольшими группами сотрудников:

- регулярный алгоритм разделения исходной энергосистемы на звездообразные эквиваленты (П. Я. Кац, Е. П. Салита, Л. М. Левит, Н. Ю. Теллинен),
- расчет послеаварийного режима в линеаризованной схеме энергосистемы (П. Я. Кац, Т. Н. Воронина, Г. Б. Косаревич),
- формула оценки устойчивости в звездообразном эквиваленте (И. А. Богомолова, И. М. Дианова, А. С. Зеккель),
- выделение «опасного сечения» (В. Д. Науменко, Н. В. Бабина),
- определение вектора, выбор и дозировка конкретных УВ из доступных (Ю. Д. Садовский, И. А. Богомолова).

Предложения, выдвигавшиеся по тому или иному направлению, обсуждались коллективно. При этом модное в то время выражение «мозговой штурм» было вполне применимым к атмосфере этих обсуждений. Всей этой работой руководил Ю. Д. Садовский, я участвовал только в обсуждениях.

Общий алгоритм определения и дозировки УВ перекладывался на язык программы, обкатывался в самых разных ситуациях, корректировался и вжимался в структуру ЦСПА.

По результатам разработки основных составляющих алгоритма ЦСПА опубликован целый ряд статей, в частности [4–8]. ЦСПА в целом впервые представлена в [9].

К концу неоднократно переносившегося срока окончания разработки была сформирована ЦСПА как устройство противоаварийного управления, оценены ее реальные технические возможности с учетом используемых технических средств в контуре управления с учетом требований надежности их функционирования в условиях непрерывной эксплуатации.

Из сказанного очевидно, что работа шла в тесном взаимодействии разработчиков основного алгоритма с группой специалистов ОДУ Урала.

Этапы внедрения в эксплуатацию столь сложного нового устройства прошли относительно быстро. Этому способствовали с одной стороны желание скорее сократить массовые отключения потребителей, а с другой – вера в успех разработчиков и руководителей организации, в которой это внедрение проводилось. В 1986 г. ЦСПА была включена в промышленную эксплуатацию.

На последнем этапе разработки и в работе по внедрению ЦСПА я практически не участвовал. В это время одним из главных направлений в тематике НИИПТ было участие в разработке перспективного плана развития системообразующей сети ЕЭС СССР с широким использованием ВЛ 1 150 кВ переменного и 1 500 кВ постоянного тока. Лаборатории электрических систем в этой общей теме отводились вопросы надежности и противоаварийного управления. Этой проблеме посвящена моя докторская диссертация [10]. В иерархической структуре системы противоаварийного управления ЕЭС ЦСПА отводилась роль среднего звена (уровень ОЭС).

Кстати, стоит сказать о попытках создать подобное ЦСПА устройство в США. По рассказам участника этих попыток А. А. Меклина, бывшего сотрудника СЗО ЭСП, участвовавшего на начальной фазе нашей работы, одним из главных препятствий при разработке подобного устройства было неприятие постулатов без строгих доказательств. Но мне кажется, дело не только в этом. Нам подобное устройство было остро необходимо, а в США – нет. С другой стороны, рассматривая тяжелые американские аварии и примеряя к ним ЦСПА, легко обнаружить, что при наличии таких устройств по крайней мере некоторые из этих аварий можно было бы предотвратить.

Если бы не острая нужда в то время в устройстве такого рода, то, возможно, и у нас к этому устройству отнеслись бы с большей подозрительностью. Алгоритм устройства базируется на ряде допущений и гипотез. Основные из них:

- в соответствии с алгоритмом ЦСПА УВ при каждом из расчетных аварийных возмущений выбираются и дозируются из доступных средств по условию сохранения статической устойчивости энергосистемы в послеаварийном режиме, при этом предотвращение нарушения динамической устойчивости в первой фазе аварийного процесса возлагается на локальные устройства ПА;
- оценка статической устойчивости сложной энергосистемы проводится по результатам оценки устойчивости звездообразных эквивалентов, образованных соответствующим разделением энергосистемы в текущем и каждом из возможных послеаварийных режимов энергосистемы;

- статическая устойчивость в послеаварийных режимах звездообразных эквивалентов определяется эвристической формулой с использованием соотношений активных и реактивных мощностей в консервативной модели;
- расчет послеаварийного режима энергосистемы (в том числе за пределами реально возможного существования) выполняется без учета нелинейностей.

Все эти положения не имеют строгих обоснований и базируются на опыте исследования режимов и устойчивости различных энергосистем СССР и подтверждаются опытом расчетов многочисленных схемно-режимных и аварийных ситуаций в ОЭС Урала и других энергосистем.

Разработчики алгоритма лучше, чем кто-либо другой, понимали зыбкость его доказательной базы, понимали, что, в сущности, наше устройство – это «черный ящик». Понимали и то, что разрабатывая ЦСПА, мы все время находились как бы в зоне «искусственной устойчивости»: шаг влево – и алгоритм при всех его ухищрениях не обеспечивает приемлемый уровень точности дозировки УВ при предельно допустимой длительности расчетного цикла, шаг вправо – и располагаемые технические средства не обеспечивают реализацию алгоритма ЦСПА и требуемого уровня надежности устройства в контуре управления.

Понимал ли я, что рискую? Конечно, понимал. В той или иной мере понимали и все сотрудники, рисковал К. М. Антипов, безусловно рисковал Е. А. Мошкин. Впрочем, про себя могу сказать, что вряд ли задумывался о том, чем именно рискую.

В работе по ЦСПА была занята значительная часть сотрудников ЛЭС. Не сокращался и объем других обязательных работ. Как участвовавшие, так и не участвовавшие в работе по ЦСПА сотрудники чувствовали напряженность жизни лаборатории. Очевидно, что напряженность была и в ОЭС Урала. В то же время мы видели перед собой цель – радикальное снижение объема аварийных отключений потребителей в ОЭС Урала и верили в ее достижимость.

Первый же год эксплуатации «черного ящика» показал его эффективность. Для количественной оценки эффекта от внедрения ЦСПА в течение года выполнялись расчеты «пост-фактум» для всех случаев аварийных возмущений, при которых согласно уставкам локальных устройств ПА должно было происходить отключение потребителей. Суммарный объем этих псевдо-отключений сопоставили с реальным суммарным объемом отключений от действия ЦСПА. При сопоставлении выявился огромный эффект – снижение объема ОН более, чем в 10 раз, не говоря уже о сокращении объема отключения генерации.

Несмотря на этот успех, на нас продолжали сыпаться обвинения в отсутствии строгих доказательств правомерности исходных положений алгоритма. Но вопреки этим обвинениям академик Ю. Н. Руденко выдвинул нашу работу на представление ее к Государственной премии СССР (самовыдвижение не предполагалось).

В соответствии с правилами работа, выдвинутая на соискание Государственной премии, подлежала обсуждению в научных советах ведущих организаций (МЭИ, ЛПИ, ИЭИ, ВНИИЭ). Понятно, что поддерживать выдвижение «чужой» работы на премию не самое приятное занятие для членов советов. Приходилось отбиваться. Наибольшему остракизму подвергалась оценка устойчивости энергосистемы по звездным эквивалентам, иногда упрекали в отсутствии ссылок и сопоставления с известным узловым методом оценки устойчивости П. Димо [11]. Мы сознательно

не использовали этот метод, т.к. он не позволял выявить связь между возмущением (отключение конкретной ВЛ) и требуемым управляющим воздействием. Сопоставление методов по условиям использования их при разработке ЦСПА проведено в [10]. Что касается обоснования, то этот метод, как и всякий другой, включающий эквивалентирование энергосистемы, не может быть строго математически обоснован.

Успешно, в конечном счете, удалось провести и кампанию по минимизации потерь при определении списка будущих лауреатов. Не буду описывать тернистый путь решения этой задачи, отмечу лишь, что далеко не все участники работы вошли в список, представленных к Госпремии, но вошедшие в этот список того заслуживают.

В списке лауреатов Государственной премии СССР от НИИПТ представлены Л. А. Кошечев, Ю. Д. Садовский, И. А. Богомолова, П. Я. Кац, от ОДУ Урала Е. А. Мошкин, А. Т. Демчук, Е. Б. Короткин, от ЦДУ ЕЭС СССР А. А. Окин. Очень жаль, что в списке отсутствуют Ю. В. Масайлов, А. М. Слодарж и многие другие активные участники работы. Замечу в скобках, что в списке лауреатов Госпремии за разработку и внедрение первой в стране и крупнейшей в мире вставки постоянного тока в составе электропередачи СССР – Финляндия, наиболее практически значимой разработки НИИПТ по тематике передачи электроэнергии постоянным током от НИИПТ представлен один сотрудник.

Наша работа успешно прошла конкурс из трех работ, выдвинутых на Госпремию по энергетической тематике, хотя была представлена наименьшим числом «остепененных» (из восьми один доктор и четыре кандидата технических наук), в отличие от двух других работ, в числе участников которых был и академик, и члены-корреспонденты, не говоря уже о докторях наук.

Здесь уместно еще поговорить о названии нашего устройства. Вынесенная в заглавие данной статьи аббревиатура ЦСПА, если и использовалась в процессе разработки, то наряду с другими – ЦПА, ЦПУ, АЦПУ. В документах на представление к Государственной премии СССР значится «Адаптивная централизованная система противоаварийного управления энергообъединением».

Слово «адаптивная» определяло главную особенность нашего устройства – способность автоматически адаптироваться к текущему режиму и схеме энергосистемы в соответствии с принципом I ДО. Этим проводилось и размежевание с разработанным в ЭСП централизованным устройством ПА узла Братской ГЭС¹, базирующемся на принципе ПДО.

Присуждение нам Государственной премии СССР можно считать последним штрихом в истории создания ЦСПА, но этим не заканчивается история развития централизованного противоаварийного управления в энергосистемах. Прежде всего необходимо заметить, что после ввода в эксплуатацию ЦСПА нуждалась в корректировках, связанных с изменением условий эксплуатации, модернизацией и развитием технической базы, изменением режимов энергосистемы и т. д. В последние 1980-е и особенно в 1990-е годы НИИПТ в силу разных, в том числе финансовых причин, не мог уделить этому должного внимания. Решение текущих задач, а также использование технологии ЦСПА в комплексе «Советчик диспетчера» легло на

¹ Разработка этого комплекса ПА проводилась в то же время, что и разработка ЦСПА.

плечи И. А. Богомоловой и, разумеется, сотрудников ОДУ Урала. Лишь через 15 лет НИИПТ и его правопреемник НТЦ ЕЭС в полную силу взялись за модернизацию, а по существу создание новой ЦСПА, но это уже другая и не менее интересная история. Обращу лишь внимание читателей на специальный выпуск «Известий НТЦ Единой энергетической системы», целиком посвященный разработке нового алгоритма ЦСПА [12].

Список литературы

1. Иофьев Б. И. Автоматическое аварийное управление мощностью энергосистемы / Б. И. Иофьев. – Москва: Энергия, 1974.
2. Кощев Л. А., Садовский Ю. Д. Алгоритм дозировки управляющих воздействий противоаварийной автоматики сложных энергосистем / Л. А. Кощев, Ю. Д. Садовский // Электрические станции. – 1981. – № 9. – С. 53–58.
3. Глебовская А.А., Кощев Л.А., Садовский Ю.Д. Устойчивость и противоаварийная автоматика энергосистемы с кольцевой схемой высоковольтной сети / А. А. Глебовская, Л. А. Кощев, Ю. Д. Садовский // Электрические станции. – 1973. – № 9. – С. 65–68.
4. Приведение расчетной схемы энергосистемы к совокупности узловых моделей для дозировки управляющих воздействий противоаварийной автоматики / П. Я. Кац, Ю. Д. Садовский, Е. П. Салита, Н. Ю. Теллинен // Сборник научных трудов НИИПТ. – Энергоатомиздат, 1987.
5. Кац П. Я. Модель энергосистемы для экспресс-анализа послеаварийных режимов / П. Я. Кац // Сборник научных трудов НИИПТ. – Энергоатомиздат, 1987.
6. Богомолова И. А. Оценка устойчивости режима узловой модели энергосистемы / И. А. Богомолова // Сборник научных трудов НИИПТ. – Энергоатомиздат, 1987.
7. Богомолова И. А., Дианова И. М. Автоматический выбор управляющих воздействий противоаварийной автоматики на базе узловых моделей энергосистемы / И. А. Богомолова, И. М. Дианова // Сборник научных трудов НИИПТ. – Энергоатомиздат, 1987.
8. Науменко В. Д. Алгоритм определения опасного по условиям устойчивости сечения энергосистемы / В. Д. Науменко // Сборник научных трудов НИИПТ. – Энергоатомиздат, 1987.
9. Адаптивная централизованная система противоаварийной автоматики / Л. А. Кощев, Е. А. Мошкин, А. А. Окин // Электричество. – 1991. – № 10.
10. Кощев Л. А. Методические основы создания централизованной системы противоаварийного управления ЕЭС СССР и исследование ее эффективности: дисс. ... д-ра техн. наук / Л. А. Кощев. – 1987.
11. Димо П. Узловой анализ энергосистем / П. Димо. – Москва: Мир, 1973. – 263 с.
12. Известия НТЦ Единой энергетической системы (специальный выпуск) / [глав. ред: Л. А. Кощев]. – № 1 (68). – 2013. – 135 с.

Кощев Лев Ананьевич, д-р техн. наук, профессор, научный руководитель Научно-технического центра Единой энергетической системы (АО «НТЦ ЕЭС»).

E-mail: ntc@ntcees.ru