

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ

Приведены результаты исследования систем электроснабжения городов как объекта управления. Установлена необходимость повышения уровня автоматизации управления техническими процессами на ее нижних уровнях. Обоснована целесообразность применения для комплексного автоматизированного управления режимами напряжения и реактивной мощности вольтодобавочных трансформаторов с тиристорным управлением.

**Ф.П. Говоров, **В.Ф. Говоров, *Б.М. Верещук*

**Кафедра
«Светотехника и источники света»
Харьковской государственной академии
городского хозяйства,*

***Кафедра Электроснабжения городов
Харьковской государственной академии
городского хозяйства, 61002, г. Харьков,
ул. Революции. 12*

E-mail: govorov@ksame.kharkov.ua

1. Введение

Современные города являются крупнейшими потребителями электрической энергии (ЭЭ). В настоящее время их мощность соизмерима с мощностью крупных промышленных предприятий. В городах сегодня не только проживает свыше 60% населения государств, но и сосредоточена большая часть их промышленного производства. Причем рост количества городов и численности населения в них имеет прогрессирующий характер. Особенно интенсифицировались процессы урбанизации в последние годы в связи с бурным развитием торговли, малого и среднего бизнеса. В результате города превратились в крупные мегакомплексы, имеющие разветвленные сети и потребляющие десятки млн. кВт.ч. электрической энергии в сутки. При этом сохраняется устойчивая тенденция ежегодного роста протяженности сетей городов и уровня их электропотребления. Это обусловило значительное увеличение нагрузки на элементы сети и в определенной степени ухудшило условия нормального функционирования систем электроснабжения, в одних случаях, либо сделало невозможной работу отдельных из них, в других. В связи с вышеизложенным, в насто-

ящее время встал вопрос о пересмотре режимов и параметров СЭС многих городов. Однако, как свидетельствует мировой опыт, решение этой проблемы в рамках существующей концепции не дает положительных результатов. Это связано с применением устаревших критериев оценки и методов расчета параметров режима сетей, методов и технических средств управления ими.

2. СЭС городов как объект управления

Как объект управления, СЭС городов представляют собой достаточно сложные многоуровневые развивающиеся системы с большим числом внутренних и внешних связей, быстротой и непрерывностью изменения параметров технологического процесса производства, передачи и распределения ЭЭ. Устойчивое функционирование таких систем, затраты на эксплуатацию и ущерб у потребителей во многом определяются уровнем автоматизации управления параметрами технологического процесса.

Во всем многообразии схем и режимов работы СЭС городов в технологической схеме снабжения электроэнергией

ей ее потребителей может быть выделен ряд общих технологических операций. Эффективность выполнения каждой из них решающим образом влияет на технико-экономические показатели систем электроснабжения и подключенных к ним электроприемников. Наиболее низкой является эффективность операций по распределению ЭЭ между отдельными потребителями. Потери ЭЭ на этом этапе в настоящее время в несколько раз превышают потери на ее передачу. По данным [1,2] потери мощности в сетях среднего и низкого напряжения США, Англии, Германии, Японии и др. составляют в настоящее время 8 и 12%, соответственно, в то время как потери мощности в сетях высшего напряжения не превышают 4%. В Украине и государствах СНГ положение еще хуже. Потери мощности в сетях среднего и низкого напряжения достигают в них в среднем 15-20%.

Анализ причин создавшегося положения указывает на то, что важнейшим направлением энергосбережения в СЭС городов является улучшение качества энергии (КЭ) и повышение уровня компенсации реактивной мощности в них. В ведущих государствах мира (США, Англия, Франция, Германия, Япония) уже давно ежегодный прирост электропотребления на 5-10% компенсируется не за счет роста генерирующих мощностей, а за счет повышения эффективности технологического процесса на различных стадиях энергетического производства. Следствием этого является то, что потери ЭЭ в них ниже в несколько раз, а технологический расход ЭЭ у потребителей на порядок меньший чем в Украине, и государствах СНГ.

Оценка действительного положения свидетельствует о том, что на эффективность протекания технических процессов в СЭС городов влияет большое число факторов: мест установки, мощности и степени загрузки оборудования, схем и параметров сетей, качества и уровня автоматизации процессов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности. В большинстве своем указанные проблемы решаются на стадии перспективного и текущего планирования режимов работы сетей [3]. Однако, широкий диапазон в сочетании с высокой скоростью изменения параметров режима СЭС требуют решения задачи на уровне оперативного либо автоматического управления.

Как показывает анализ, автоматическое управление технологическими процессами производства, передачи и распределения ЭЭ в СЭС городов осуществляется в настоящее время практически только на её верхних уровнях (Рис.1) [4].

В основном это автоматические устройства локального действия, осуществляющие только функции автоматического регулирования коэффициента трансформации (АРКТ) трансформаторов с РПН либо реактивной мощности батарей статических конденсаторов, устанавливаемых на центрах питания (ЦП). В отдельных случаях на энергетических объектах особой важности (преимущественно электрических станциях, реке – подстанциях) применяются системы автоматического управления нормальными (САУ НР) либо аварийными (САУ АР) режимами. В большинстве случаев это централизованные системы автоматического регулирования частоты и реактивной мощности (ЦСАРЧМ), напряжения (ЦСАРН) либо предотвращения нарушения устойчивости (ЦСАПНУ). В последнее время в СЭС городов всё более широкое распространение начали получать системы автоматизированного управления. Это системы автоматизированного диспетчерского управления (АС/ДУ), реке – системы автоматизированного управления технологическими процессами (АСУ ТП).

На нижних уровнях СЭС городов применяются в основном системы ручного управления. В отдельных случаях применяются системы дискретного логического управления. В то же время, определяющее влияние на эффективность работы СЭС городов оказывают режимы работы именно элементов нижнего уровня – распределительных электрических сетей среднего и низкого напряжения, которые имеют наибольшую протяжённость и к которым непосредственно подключена основная масса

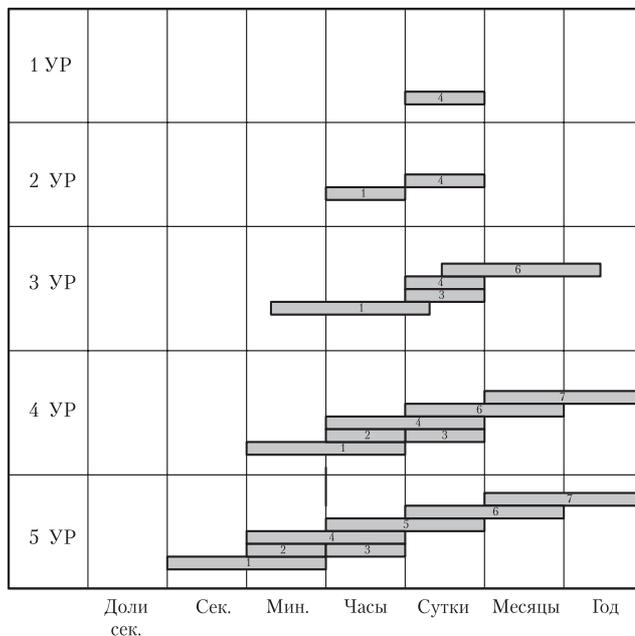


Рисунок 1. Уровни управления СЭС (1УР-5УР) – питающие и распределительные сети высшего, среднего и низкого напряжений, соответственно.

потребителей. Поэтому важнейшим направлением повышения эффективности использования ЭЭ в СЭС городов является автоматизация управления режимами РС среднего и, особенно, низкого напряжения.

Полноценное оперативное управление распределительными электрическими сетями городов в настоящее время существенно затруднено в связи с их большой протяжённостью и наличием значительного числа линий и узлов. По этой причине решается только та часть задач управления режимами распределительных электрических сетей, которая касается циклов с большим периодом обращения информации (перспективного, годичного и краткосрочного планирования) [3]. Та же их часть, которая касается циклов с малым периодом обращения информации (оперативного и технологического управления) решается лишь на интуитивно-эмпирической основе на уровне дискретного ручного либо автоматического управления отдельными видами оборудования. Это является причиной значительного снижения эффективности работы сетей и подключенных к ним электроприёмников. При этом низкий уровень автоматизации, неполнота и невысокий уровень достоверности первичной информации в значительной степени снижают качество управления сетями и эффективность использования ЭЭ в них.

Системы управления нижнего уровня представляют собой самостоятельный слой, задача которого состоит в стабилизации технологических параметров процесса вблизи их заданного значения. Существенный недостаток таких систем, ввиду жёсткой структуры и фиксированно-

го значения параметров настройки автоматических регуляторов, состоит в том, что в течение длительного времени они работают без учёта изменчивости динамических и статических характеристик технологического объекта управления. Между тем, исследованиями установлено [4], что характеристики СЭС изменяются в широких пределах в зависимости от колебаний суточного, недельного или сезонного числа эксплуатационных факторов, проявляющихся в процессе длительной работы оборудования и сетей. Вследствие этого настройка автоматических систем и структуры регуляторов (П, ПИД, ПИ и др.), которые были оптимальными в начальный его период работы, не обеспечивает должного качества регулирования в его середине или в конце.

Существуют два способа устранения этого недостатка. Первый состоит в ручной подрегулировке настроек и структуры устройств по результатам опытного определения статических и динамических характеристик. Второй – в передаче функций по идентификации объекта и расчету настроек автоматическим устройствам. Ручной способ требует больших затрат времени и малоэффективен, в особенности при большом числе объектов или переменных режимах работы оборудования. Оба фактора одновременно имеют место в практике эксплуатации СЭС городов. Решение же задачи оптимизации режимов работы СЭС с помощью автоматических устройств лишено недостатков ручного способа, но требует некоторого усложнения системы управления в целом. Анализ работ, посвященных рассматриваемому вопросу, свидетельствует о наличии в мировой практике управления режимами работы СЭС городов тенденций автоматизации, которые необходимо учитывать при решении задач управления.

3. Системы автоматизации процессов производства, передачи и распределения ЭЭ, производимые компаниями-лидерами

Лидирующее положение в области автоматизации процессов производства, передачи и распределения ЭЭ занимает промышленная группа *Schneider* (Франция), в состав которой входят фирмы: “*Merlin Gerin*”, “*Telemecanique*”, “*Squar D*” и “*SPI Batibol*”. Общими усилиями этих организаций налажено производство большого числа многофункциональных устройств в сочетании с цифровыми интеллектуальными модулями *Serap* (щиты *Masterbloc*, *Prisma*; распределительные шкафы *Praqma*, *Opale*; автоматические выключатели с микропроцессорной системой управления *Masterpact*; адаптивные выключатели *Durt* и *Dialpact*; автоматические выключатели с системой телеуправления *Dialpact*, *Compact* и *Interpact*, интеллектуальные потребительские модули *Multi 9*, *Isis* и другие). Их применение в сочетании с автоматическими системами управления в состоянии обеспечить достаточно высокое качество управления сетями.

В области программного обеспечения систем автоматического управления ведущее положение занимает компания *Hewlett-Packard*, которая разработала систему *RTAR* в виде интегрированной системы управления энергообъектами. Система обеспечивает контроль и управление объектами от небольшой подстанции до крупной энергосети. *RTAR* работает на компьютерах с операционной системой *UNIX* компаний *Digital*, *HP*, *IBM* и *Sun Microsystems*. Примером практической реализации системы *RTAR* для управления электросетями является разра-

ботка компаний *Consolidated Edison (Con Ed)* комплекта программ для контроля и управления линиями электропередач. Система внедрена в 1995 году для управления электроснабжением основных районов «Большого» Нью-Йорка. Первая очередь проекта реализована в Бруклине, последующие: в Куинсе, Стэйтен-Айленде, Бронксе и др. Система осуществляет управление параметрами режима (значениями напряжений, токов и мощностей в узлах нагрузок) посредством воздействия на регулирующие и компенсирующие устройства. В качестве аппаратной платформы в *ACU Con Ed* реализованы рабочие станции *Hewlett-Packard* типа *HP9000s715*.

Примером реализации системы *RTAR* для управления электропотреблением отдельных потребителей является проект, реализованный *Siemens* для *Vancomer* (Мехикоситти, Мексика) – крупнейшей банковской компанией Мексики. Система осуществляет контроль из центра управления режимами работы электрических подстанций и сетей. Она обеспечивает мониторинг электропотребления (внедрено в 1995г.) и автоматизированное управление подстанциями (проект в работе). В разработанной *ACU* компанией *Siemens* *H1* использовано программное обеспечение для *UNIX HP RTAR*.

Аналогичные системы применены для управления электроснабжением корпорации *Voeng* в Сиэтле (штат Вашингтон, США), осуществлённую группой *Commercial Airplane (EMES – Energy Management Control System)* для своего производства в городе *Auburn* (штат Вашингтон, США). Производственный комплекс объединяет 75 зданий и размещается на 522 акрах. На территории комплекса были локальные системы автоматизации контроля и управления отдельными зданиями. Для управления электроснабжением всего комплекса *Voeng* применил интегрированную систему *EMCS*. Система ориентирована на управление высоковольтным оборудованием (*HVAC*), освещением и электропотреблением, сбор данных о параметрах режима и передачу их на диспетчерский пункт. В связи с ограничением электропотребления на 10-25%, вызванного ограниченными возможностями местных систем электроснабжения, система *EMCS* осуществляет самостоятельно регулирование и ограничение электропотребления. *EMCS* построена по иерархическому принципу и включает контрольно-измерительное оборудование и ЭВМ. Управляя высоковольтным оборудованием, устройствами контроля и управления, система осуществляет управление электропотреблением без отключения. Система имеет два уровня. Системы управления на верхнем уровне обеспечивают централизованное управление и сбор данных. Системы управления на нижних уровнях осуществляют управление режимами работы СЭС отдельных зданий. Они могут работать автономно либо во взаимодействии с верхними уровнями. На нижних уровнях совокупность включает систему контрольно-измерительных приборов, контролеров и микропроцессоров высоковольтного оборудования.

Своё дальнейшее развитие система получила при управлении сетями Мехико (Мексика), компании *Liwacomm* (Германия) и др. В функции таких систем управления входит контроль и управление состоянием электрических аппаратов, значением напряжений, токов и мощностей. В результате ее применения компанией *Voeng* удалось избежать несанкционированных отключений своих потребителей вследствие перерасхода ЭЭ, а компанией *Liwacomm* получена экономия средств в объеме 375000\$ за счет снижения пиковых нагрузок.

Кроме того, государственная электросетевая компания Commision Federale de Electrical (CFE, город Мехико), вырабатывающая более 120ГВт·ч электроэнергии, совместно с компаниями Siemens, Allen-Bradley, SEPAC, NSCA, Hewlet-Packard и др., в 1995 году осуществили широкую программу автоматизации подстанций. Система обеспечивает контроль всех параметров режима подстанций: напряжений, токов и мощностей на оборудовании и трансформаторах. Система взаимодействует с контроллерами Siemens, Allen-Bradley и автоматикой фирмы SEPAC, что позволило за счет повышения эффективности принимаемых оперативных решений повысить надежность и качество электроснабжения.

В значительной степени решению задачи автоматизации способствуют аппаратные решения, предлагаемые фирмой Merlin Gerin. Для их решения Merlin Gerin предлагает полный диапазон аппаратуры и оборудования, приспособленного к условиям автоматизации. Фирма Merlin Gerin разработала серию оборудования среднего напряжения, обеспечивающего наравне с передачей ЭЭ одновременную обработку информации и управление. Тем самым обеспечивается логичность взаимодействия, связь и адаптация режимов работы оборудования к изменяющимся условиям среды.

4. Технические средства, применяемые для управления режимами СЭС городов

Для управления режимами СЭС городов в настоящее время используются самые разнообразные технические средства [5]. В первую очередь, это силовые и вольтодобавочные трансформаторы, силовые конденсаторы, статические компенсаторы и т.д. Силовые конденсаторы и статические компенсаторы в городских электрических сетях не нашли широкого применения ввиду невозможности согласования законов регулирования напряжения и реактивной мощности. Поэтому в настоящее время наиболее распространёнными техническими средствами управления режимами городских электрических сетей являются силовые и вольтодобавочные трансформаторы, обеспечивающие управление режимами работы сетей по одному параметру – среднему значению отклонений напряжения трех фаз. Причём, ввиду того, что трансформаторы с переключением без возбуждения (ПБВ) допускают только сезонные изменения коэффициента трансформации, они не могут рассматриваться в качестве средств регулирования напряжения. Таким образом, основными техническими средствами управления режимами работы РС городов остаются трансформаторы с РПН и вольтодобавочные трансформаторы.

Силовые трансформаторы с РПН традиционно применяются для регулирования напряжения в точке присоединения питающих или распределительных сетей. Экономическая эффективность работы таких трансформаторов зависит от их стоимости и диапазона регулирования напряжения. Она тем выше, чем больше отклонение напряжения в сетях (то есть, чем шире диапазон регулирования напряжения). Сопоставительный анализ удельных экономических показателей регулируемых трансформаторов показывает, что удельные затраты на регулирование напряжения резко увеличиваются с уменьшением мощности [6]. Это объясняется достаточно высокой стоимостью РПН, мало зависящей от мощности трансформаторов, и обуславливает их применение на трансформаторах большой и средней мощности. В этой связи широкие возможности

открывает применение ВДТ. В Украине и государствах СНГ до настоящего времени ВДТ применялись исключительно для компенсации потери напряжения в сетях 6-10 кВ в виде нерегулируемых трансформаторов с глухим присоединением («глухих бустеров»). В.Г.Холмским, В.В.Зориным, Б.В.Колесниченко, Н.И.Архиповым была обоснована необходимость широкого применения таких трансформаторов в городских электрических сетях. Показано, что установка ВДТ в ЦП в состоянии обеспечить полную развязку режима напряжения в сетях 6-10 кВ для неоднородных групп потребителей и расширить диапазон встречного регулирования напряжения, К такому же выводу приходит и Я.Д.Баркан. Более того, утверждается, что «линейные регуляторы напряжения в ближайшем будущем бесспорно получат широкое распространение».

Аналогично обстоит дело с регулированием напряжения и в странах дальнего зарубежья. Наиболее ярким примером является энергетика США, которая характеризуется наличием протяжённых нагруженных сетей (во многих случаях воздушных). Техника регулирования напряжения развивалась в них по пути широкого применения ВДТ для централизованного и местного регулирования напряжения. До второй мировой войны процесс регулирования напряжения осуществлялся преимущественно применением ступенчатых ВДТ с РПН. Дальнейший рост нагрузок в последующем привёл к ещё более широкому применению ВДТ. В результате ВДТ с РПН стали важным средством регулирования напряжения в СЭС городов США в значительной степени вытеснившим трансформаторы с РПН. Подобным образом решаются вопросы регулирования напряжения в СЭС городов Украины и государств СНГ. Большая протяжённость сетей и их увеличивающаяся нагрузка в сочетании с низкой эффективностью и высокой стоимостью РПН на трансформаторах ЦП, делают всё более актуальным применение ВДТ для централизованного (чаще дифференцированного) либо местного (обычно группового) регулирования напряжения в сетях.

В странах Европы и Японии преимущественное применение получили ВДТ однофазной конструкции, как наиболее полно соответствующие условиям индивидуального регулирования напряжения. В отличие от этого, в США более широкое применение нашли трансформаторы трёхфазной конструкции, составляющие основу группового и централизованного регулирования напряжения. В то же время спецификой распределительных сетей городов США является высокий уровень дробления трансформаторной мощности, вызванный массовым переходом на коттеджную застройку и обуславливающий большую долю однофазных трансформаторов 11/0,4 кВ. Поэтому в СЭС городов США достаточно широко применяются и ВДТ однофазной конструкции, производством и применением которых занимаются главным образом японские и немецкие фирмы (Филипс, Аути дэнки, Мицубиси дэнки, Фудзи дэнки и другие), занимающие, несомненно, лидирующее положение.

Опыт применения ВДТ в составе систем управления распределительными электрическими системами (СУРС) городов указал на их достаточно высокую эффективность. Так, например, применение с 1990 г. национальными сетевыми компаниями Англии и Уэльса фазопереключаемых быстродействующих ВДТ в составе СУРСм позволило увеличить пропускную способность существующих сетей, повысив тем самым эффективность и качество электроснабжения потребителей. Использование энергетической компанией National Grid Co (Вели-

кобритания) мощных ВДТ, изготавливаемых компанией Peeble Electric, Power Group входящей в RoPis-Poyse Industrial позволило за счет повышения пропускной способности сетей, обеспечить возросшее потребление ЭЭ без реконструкции сетей. Обеспечение возросшего электропотребления Gicago (США) достигнуто без строительства новых линий и подстанций только за счет повышения эффективного использования существующих путем использования фазоповоротных ВДТ. Использование фазорегулируемых ВДТ для комплексного решения вопросов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в сетях Германии обеспечило экономию ЭЭ в размере до 1,7-4,2% в год. В Западной энергосистеме США для устранения больших перетоков мощности, достигающих в ряде случаев 50-75 %, получили распространение фазоповоротные ВДТ, обеспечивающие сдвиг добавочной ЭДС на $+60^\circ$, -30° [7]. На электрической станции Гранд Кули (США) получили распространение, разработанные Bureau of Reclamation по заказу Wopville Pover Administration вольтодобавочные модули. Имеются данные о применении ВДТ для продольно-поперечного регулирования напряжения в РС Китая, Болгарии и других странах. Однако применение ВДТ в настоящее время ограничивается сетями высшего (110кВ и более) напряжения, в которых достаточным является применение ступенчатого регулирования напряжения с помощью РПН. СЭС городов требуют плавного регулирования модуля и фазы добавочной ЭДС, вызванного малым значением располагаемой потери напряжения и низким значением $\cos\varphi$, а также повышенными требованиями потребителей к КЭ.

Анализ известных схем ВДТ с плавным регулированием напряжения свидетельствует, что лучшими технико-экономическими показателями обладают устройства с электронным управлением (Рис.2).

Сочетание в них достоинств магнитной и полупроводниковой техники позволяет решать достаточно простыми и удобными способами вопросы плавного бесконтактного регулирования напряжения в достаточно широких пределах. А последовательное соединение вольтодобавочной обмотки ВДТ с нагрузкой обуславливает пропускание через трансформатор только дополнительного количества энергии, чем обеспечиваются улучшенные массогабаритные и стоимостные показатели ВДТ.

Возможность установки ВДТ в любой точке сети в сочетании с улучшенными массогабаритными и стоимостными показателями, а также высоким уровнем автоматизации управления, создают условия для успешного интегрирования их в существующие системы управления режимами работы СЭС городов. Более того, опыт применения ВДТ с электронным управлением в СЭС г.Харькова показал, что высокий уровень автоматизации создаёт условия для их успешной адаптации к современным системам управления любого уровня сложности и обеспечивает экономию значительного числа материальных, топливных и энергетических ресурсов.

5. Выводы

Проведенный анализ свидетельствует о наличии всех данных для технико-экономической оптимизации режимов СЭС городов. Дальнейшее повышение эффективности и качества работы СЭС городов может быть достигнуто за счёт повышения уровня автоматизации управления сетями 6-10 и, особенно, 0,38 кВ, а также последующего интегрирования автоматических устройств в существующие

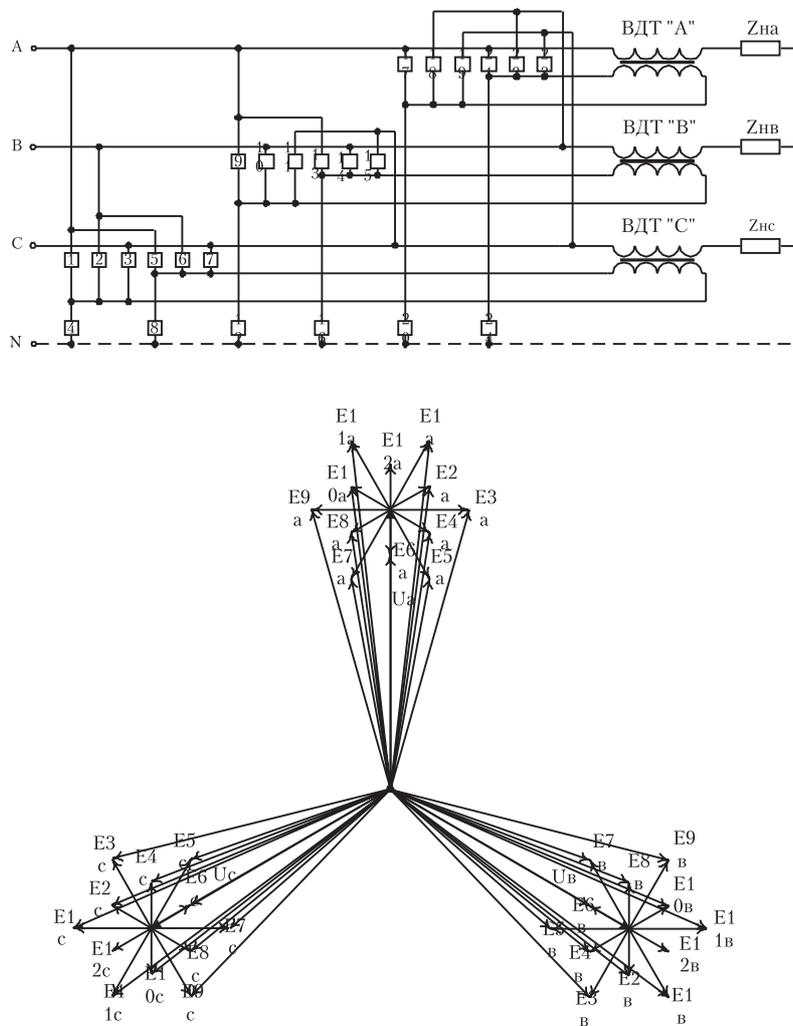


Рисунок 2. Принципиальная схема (а) и векторная диаграмма (б) фазопереключаемого ВДТ

системы контроля и управления сетями. Технические возможности современных информационных управляющих систем (программное и техническое обеспечение) вполне допускают такую возможность. В этом случае СЭС городов превращаются в информационно – измерительный и управляющий комплекс кибернетического типа, глобальной целью функционирования которого является его оптимальное функционирование как единого целого.

Литература

1. Говоров Ф.П. Проблемы регулирования напряжения в городских электрических сетях 6 – 10/0,4 кВ // Коммунальное хозяйство городов. – 1993. – №7. – с. 37 – 41.
2. Маркушевич Н.С. Автоматизация управления режимами электрических сетей 6-20 кВ. – М.: Энергия, 1980. – 209 с.
3. Говоров Ф.П. Керування режимами розподільних електричних мереж на основі гнучких систем: автореф. Дис...докт.техн.наук: 05.14.02. – Львів, 2001. – 34 с.
4. Маркушевич Н.С., Солдаткина Л.А. Качество напряжения в городских электрических сетях. – М.: Энергия, 1975. – 256 с.
5. Дірар Муса Абу-Сісі. Використання вольтоподавальних трансформаторів з електронним керуванням для поліпшення якості електричної енергії у міських електричних мережах: автореф. Дис... канд.техн.наук: 05.14.02 – К., 1999. – 17 с.
6. Unified power flow controller: The Ultimate FACTS Device / Stahekopf U.E. // Mod. Power Syst. – 1996.- 16, №4. – с. 57-61.



Говоров Филипп Парамонович, доктор технических наук, профессор.

Заведующий кафедрой «Светотехника и источники света» Харьковской государственной академии городского хозяйства.

Научные интересы лежат в области управления и регулирования параметров электрических сетей и повышения качества электрической энергии.

E-mail: govorov@ksame.kharkov.ua



Говоров Владимир Филиппович, аспирант кафедры Электроснабжения городов Харьковской государственной академии городского хозяйства.

Круг научных интересов: управление и регулирование параметров электрических сетей, повышение качества электрической энергии.

E-mail: govorov@ksame.kharkov.ua



Верещук Борис Михайлович, аспирант кафедры «Светотехника и источники света» Харьковской государственной академии городского хозяйства.

Круг научных интересов: управление и регулирование параметров электрических сетей, повышение качества электрической энергии.

Контактный телефон (0572)45-90-15

E-mail: govorov@ksame.kharkov.ua