

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каверин В.В. Регулировочные характеристики электропривода постоянного тока в режиме динамического торможения // Тр. ун-та; КарГТУ. Караганда, 2009. № 3. С.77-79.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 768 с.
3. Компьютерное моделирование и идентификация электротехнических комплексов: учеб. пособие. В 3-х ч. Часть 3 / Б.Н. Фешин, Ю.Ф. Булатбаева, Г.С. Нурмаганбетова, Г.И. Паршина, Ш.З. Телбаева; Карагандинский гос. техн. ун-т. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2010. 63 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб: КОРОНАпринт, 2007. 256 с.
5. Каверин В.В., Эм Г.А. Генераторные режимы регулируемого электропривода горных машин // Труды XII Международной научной конференции «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030» (23-24 июня 2009 г.). Выпуск 2 / Министерство образования и науки РК, Карагандинский государственный технический университет. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2009. С.225-227.
6. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х т. Т.1. / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 598 с.

УДК 621.313.2:621.314.58

ЭМ Г.А.

Генераторные режимы четырехквadrантного тиристорного электропривода постоянного тока

Замечательные регулировочные свойства, жесткость механических характеристик, высокая плотность энергии и экономичность машин постоянного тока с независимым возбуждением обусловили их распространение в различных отраслях промышленности. В частности, тиристорный электропривод постоянного тока (ТЭП ПТ) используется в шахтных подъемных установках, экскаваторах, крановых механизмах, угледобывающих комбайнах, буровых установках и др. В процессе эксплуатации указанных классов горных машин и механизмов востребованы как двигательный, так и генераторные режимы работы. Причем управляемые генераторные режимы технологического торможения для большинства рассматриваемых машин носят продолжительный характер.

В таблице 1 приведена сравнительная характеристика ТЭП ПТ независимого возбуждения рассматриваемых классов горных машин и механизмов, в которой отражены, в том числе, диапазоны скорости, используемые генераторные режимы и их продолжительность, определяемые технологическими требованиями и нормативами безопасной эксплуатации [1].

Функциональная схема ТЭП ПТ с реверсом по цепи якоря приведена на рисунке 1.

Двухкомплектный (реверсивный) тиристорный преобразователь ТП, обеспечивает работу ТЭП ПТ во всех четырех квадрантах механической характеристики как в двигательном, так и в генераторных режимах. Система автоматического регулирования САР в соот-

ветствии с заданием U_z и сигналами датчиков тока BA и скорости BR вырабатывает сигнал управления U_y , подаваемый на управляющие электроды тиристоров.

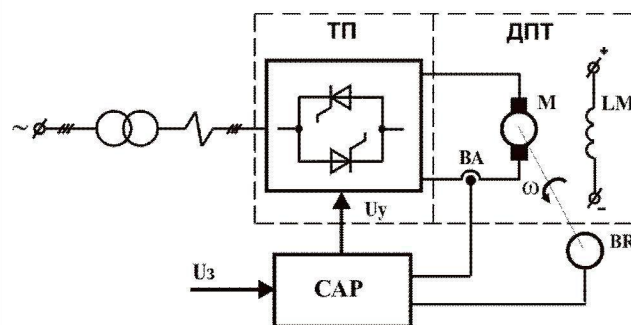


Рисунок 1 – Функциональная схема ТЭП ПТ с реверсом по цепи якоря

Двигательный режим ТЭП ПТ изучен достаточно полно. В отличие от него управляемые генераторные режимы, а также динамические свойства четырехквadrантного ТЭП ПТ при переходе из двигательного режима в генераторный и обратно в составе регулируемого четырехквadrантного электропривода исследованы в недостаточной степени [1, 2].

Как известно, в электроприводе с двигателем постоянного тока независимого возбуждения могут быть использованы три возможных генераторных режима: динамическое торможение, противовключение и ре-

Таблица 1 – Сравнительная характеристика ТЭП ПТ горных машин и механизмов

Область применения	Диапазон скорости	Мощность привода, кВт	Используемые генераторные режимы	Продолжительность генераторных режимов
Шахтные подъемные машины	1:100	70 – 220	противовключение, динамическое торможение	продолжительный
Буровые станки	1:10 – 1:200	10 – 100	динамическое и рекуперативное торможение	продолжительный, повторно-кратковременный
Экскаваторы	1:10	10 – 200	динамическое и рекуперативное торможение	повторно-кратковременный
Механизмы подачи очистных комбайнов	1:25	10 – 60	противовключение, динамическое и рекуперативное торможение	продолжительный, кратковременный
Крановые механизмы	1:15 – 1:30	10 – 200	противовключение, динамическое торможение	повторно-кратковременный

куперативный режим (с отдачей энергии в сеть). Из них в настоящее время, несмотря на значительные потери энергии в токоограничивающих резисторах, наиболее широко применяется динамическое торможение. Системы динамического торможения обеспечивают эффективное торможение со скорости, близкой к номинальной, в то же время в электроприводах грузоподъемных машин и механизмов, где требуемый диапазон регулирования скорости изменяется от 1:15 до 1:100 [3-5], этот способ в нижней части диапазона малоэффективен. Организация динамического торможения требует также значительных затрат, связанных с дополнительными схемотехническими решениями в силовой части электропривода и системе управления. Кроме того, для электропривода средней и большой мощности, характерного для грузоподъемных машин, большие габариты токоограничивающих реостатов и теплотехнические требования к их установке вынуждают занимать значительные площади. Указанные недостатки приводят к снижению надежности и рентабельности электропривода.

Следует отметить, что для ряда горных машин и механизмов, таких как напочвенные канатные дороги, лебедки буровых станков и др., требуется управление параметрами электропривода в двигательном и генераторных режимах работы при знакопеременном моменте сил сопротивления. Обеспечение приемлемой точности стабилизации скорости и удовлетворительных динамических характеристик электропривода в этих условиях при использовании систем динамического торможения весьма проблематично. Более эффективным является генераторное торможение с рекуперацией энергии в сеть.

Однако практическое использование рекуперативного режима наталкивается на ряд технических трудностей. Так, к нерешенным вопросам применения рекуперативного торможения, в том числе, относится определение реального диапазона существования этого режима по скорости. Суть проблемы заключается в том, что в связи с односторонней проводимостью вентиля и импульсной формой напряжения на выходе управляемого выпрямителя режим рекуперативного торможения может быть реализован только тогда, когда амплитудное значение ЭДС двигателя превышает амплитудное значение ЭДС источника электроэнергии по модулю. Между тем, при анализе режима рекуперативного торможения в тиристорных электроприводах, как правило, рассматривается не амплитудное, а действующее или среднее значение ЭДС источника. Следовательно, режим рекуперативного торможения может быть реализован в более узком диапазоне изменения параметров электропривода, чем это предполагалось до сих пор классической теорией.

При малых значениях частоты вращения двигателя в рекуперативном режиме работы амплитудное значение ЭДС якоря значительно меньше амплитудного значения ЭДС источника энергии. В этом случае практически невозможно развить тормозной момент достаточной величины. Иными словами, в приводе, где реализована большая глубина регулирования по скорости, не представляется возможным осуществление максимального тормозного момента при малых

значениях угловой скорости, поскольку внутреннее сопротивление двигателя и источника питания не позволяет обеспечить ток в цепи якоря, необходимый для развития максимального значения момента [2].

С другой стороны, наиболее эффективным способом поддержания скорости, близкой к ползучей, в генераторных режимах является использование торможения противовключением. В режиме противовключения при малых значениях ЭДС тиристорного преобразователя можно получить непрерывный ток за счет ЭДС двигателя и развить тормозной момент, достаточный для поддержания стабильной скорости.

В то же время технологическими условиями работы рассмотренных машин и механизмов востребован реверс, также осуществляемый в режиме противовключения [3-5].

Таким образом, для реализации четырехквadrантного ТЭП ПТ представляется целесообразным совместное использование генераторных режимов торможения противовключением и с рекуперацией энергии в сеть.

В связи с тем, что подавляющее большинство серийно выпускаемых комплектных ТЭП ПТ не предполагает наличия токоограничивающих резисторов в цепи якоря, в работе проводился анализ генераторных режимов и их характеристик без токоограничивающего сопротивления.

С целью исследования особенностей указанных генераторных режимов, определения рабочих областей их применения и обнаружения оптимальных границ перехода из одного режима в другой в программной среде *MatLab 7.01 – Simulink 6.1*. была разработана имитационная модель, представленная на рисунке 2.

Имитационная модель здесь разделена на следующие сегменты:

- 1 – трехфазный источник переменного напряжения, позволяющий учитывать как реактивные, так и активные составляющие его компонентов;
- 2 – субблок трехфазного двухкомплектного реверсивного полностью управляемого тиристорного преобразователя с блоком задания угла управления тиристоров;
- 3 – блок, моделирующий электрическую часть (сопротивление и индуктивность якорной цепи) машины постоянного тока;
- 4 – датчики тока и напряжения;
- 5 – субблок, моделирующий электромеханическую часть машины постоянного тока, с блоком задания активного раскручивающего момента;
- 6 – виртуальный измерительный комплекс для осциллографирования и дальнейшей обработки измеряемых сигналов с целью получения механических характеристик.

Фрагмент имитационной модели, формирующий электромеханическую часть машины постоянного тока, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} M_{дв} = k\Phi \cdot i_{я}, \\ M_{д} = M_{р} - M_{дв}, \\ \omega = \frac{1}{J} \int (M_{р} - M_{дв}) dt, \\ E_{я} = k\Phi \cdot \omega, \end{cases} \quad (1)$$

где $M_{ДВ}$ – электромагнитный момент, развиваемый двигателем;

M_p – раскручивающий момент, приведенный к валу электродвигателя;

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} - \text{момент динамический};$$

$E_{я}, i_{я}$ – соответственно ЭДС и ток якоря.

В имитационной модели были реализованы генераторные режимы, обусловленные наличием положительного раскручивающего момента, характерного для грузоподъемных установок, и отрицательного тормозного момента электрической машины [6]. Формирование активного раскручивающего момента, изменяющегося по линейному закону в функции времени в диапазоне от 0 до M_H , обеспечивает субблок *Subsystem2*. При этом интенсивность изменения раскручивающего момента, так же как и угла управления тиристоров α и произведения $k\Phi$, определялась из условия необходимости минимизировать влияние динамических процессов, протекающих в электро-механической части двигателя, на статические характеристики электропривода.

Имитационное моделирование проводилось на примере получивших распространение, в том числе в горной промышленности, двигателей постоянного тока с независимым возбуждением серии 4ПФ сред-

ней мощности, характеристики которых приведены в таблице 2.

В результате экспериментов, проведенных в рекуперативном режиме, были получены три семейства механических характеристик для двигателей 4ПФ132L, 4ПФ160L и 4ПФ180L при изменении угла управления тиристоров инверторной группы от 90° до 140° . В процессе моделирования раскручивающий момент изменялся в диапазоне от 0 до номинального значения M_H , соответствующего каждому типу электрической машины.

В ходе имитационных экспериментов также были получены три семейства механических характеристик ТЭП ПТ в режиме противовключения при отсутствии токоограничивающих резисторов в якорной цепи для второго квадранта механических характеристик. В этом случае угол управления тиристоров изменялся в диапазоне $90^\circ - 120^\circ$.

На рисунке 3 механические характеристики, соответствующие режиму противовключения, с целью выявления рабочих областей совместного использования рассматриваемых генераторных режимов совмещены с полученными ранее характеристиками рекуперативного режима.

На рисунке зона прерывистых токов рекуперативного режима находится в заштрихованных областях,

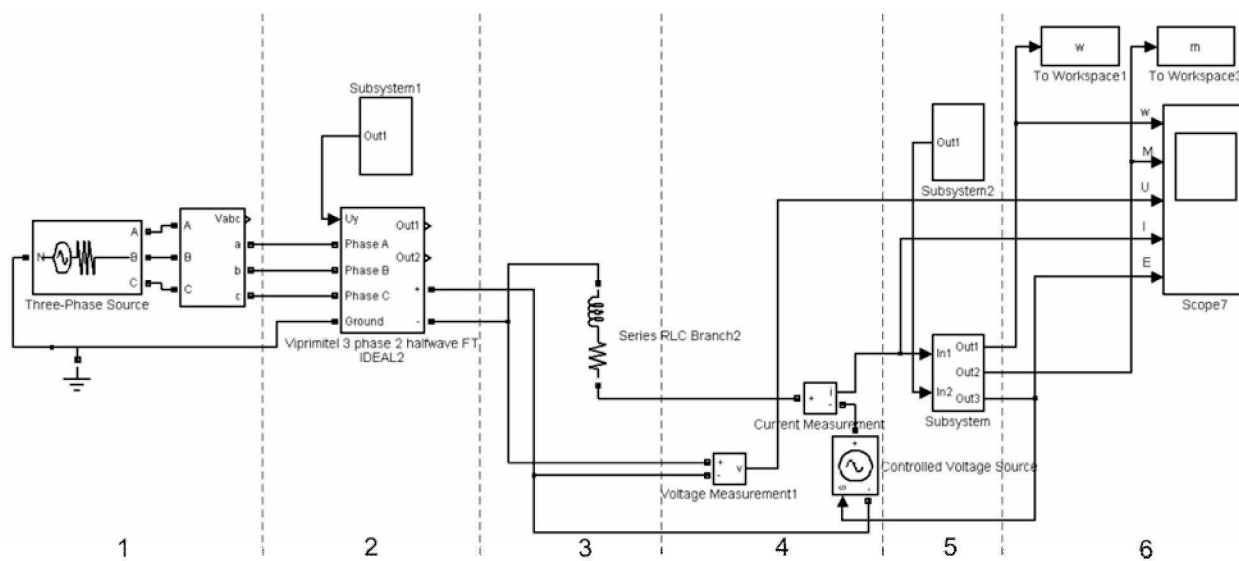


Рисунок 2 – Имитационная модель для исследования генераторных режимов ТЭП ПТ

Таблица 2 – Характеристики двигателей постоянного тока серии 4ПФ

Тип двигателя	4ПФ132L	4ПФ160L	4ПФ180L
Номинальное напряжение U_H , В	440	440	440
Номинальный ток якоря I_H , А	59,59	116,5	176
Номинальная мощность P_H , кВт	22	45	68
Электромеханическая постоянная двигателя T_M , сек	0,156857	0,164327	0,286001
Суммарное активное сопротивление цепи якоря $R_{я\Sigma}$, Ом	0,623	0,2361	0,1741
Суммарное индуктивное сопротивление цепи якоря $L_{я\Sigma}$, Гн	0,019483	0,023761	0,026834
Механическая постоянная двигателя T_d , сек	0,031274	0,10064	0,154132
Номинальная угловая скорость ω_H , рад/с	157	157	157
Номинальный момент M_H , Н·м	140,127	286,624	433,121
Произведение $k\Phi_H$, Вб	2,62735	2,56606	2,607378
Момент инерции ротора J , кг·м ²	0,140	0,300	0,789

ограниченных пунктирной линией. Внешний вид полученных характеристик позволяет сделать вывод о значительной деформации механических характеристик в зоне прерывистых токов.

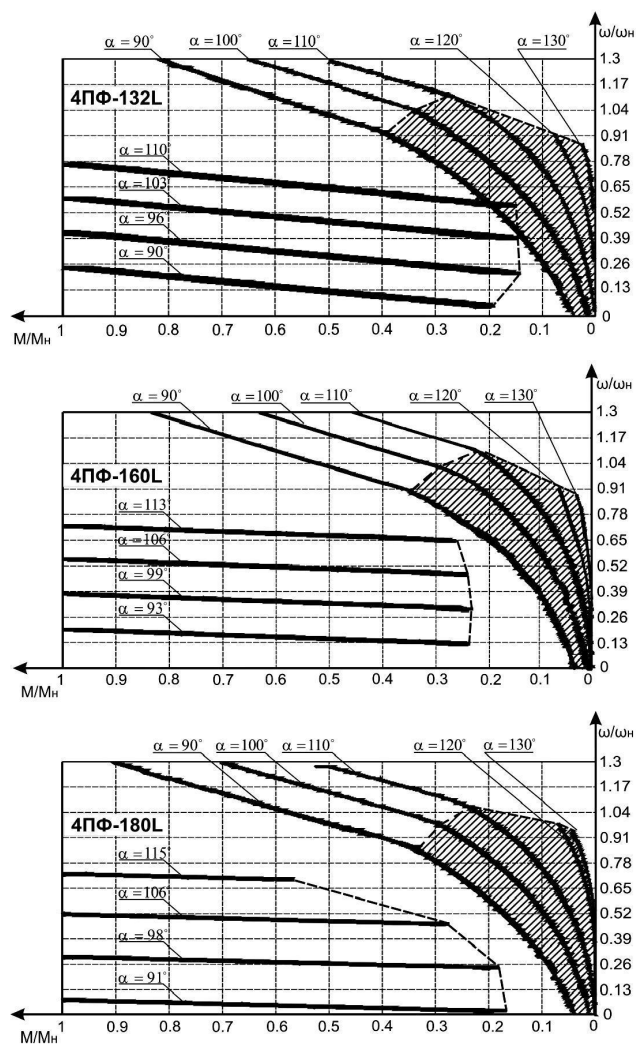


Рисунок 3 – Результаты имитационных экспериментов

Анализ результатов имитационных экспериментов для рассмотренных типов двигателей при совмещении двух генераторных режимов показал следующее:

1) жесткость механических характеристик во всем диапазоне скоростей в режиме противовключения значительно выше, чем в рекуперативном режиме, что необходимо учитывать при построении систем автоматического регулирования ТЭП ПТ для совместного использования режимов рекуперации и противовключения;

2) с увеличением мощности электропривода наблюдается повышение жесткости характеристик, характерное для обоих генераторных режимов, что объясняется уменьшением падения напряжения при увеличении сопротивления якорной цепи;

3) рабочий диапазон угла управления тиристором составляет в рекуперативном режиме $\alpha=90^\circ \dots 130^\circ$, а для режима противовключения $90^\circ \dots 115^\circ$;

4) во всем диапазоне рассматриваемых мощностей электродвигателей обнаруживается зона неприменимости как рекуперативного, так и режима противок-

лючения, ограниченная снизу максимальным углом управления тиристором выпрямителя 120° для режима противовключения и сверху минимальным углом управления инвертора для рекуперативного режима – 90° ;

5) режим непрерывного тока при рекуперативном торможении осуществим практически лишь для углов управления от 90° до 110° ;

6) в рекуперативном режиме величина зоны прерывистых токов сопоставима с величиной области непрерывного тока;

7) зона прерывистых токов в рекуперативном режиме в основном приходится на диапазон скорости вниз от номинальной.

Таким образом, рабочая область рекуперативного режима ограничена вниз от номинальной скорости углом управления тиристором 90° . Как отмечалось выше, сужение диапазона рекуперации объясняется импульсным характером работы и односторонней проводимостью вентиля тиристорного преобразователя: поскольку режим рекуперативного торможения может быть реализован только тогда, когда амплитудное значение ЭДС двигателя превышает мгновенное значение ЭДС источника энергии, это приводит к значительному уменьшению области реализации рекуперативного режима.

Ограничение рабочей области режима противовключения при малых значениях развиваемого момента, очевидно, объясняется следующим: с увеличением скорости растет значение ЭДС двигателя, в то же время напряжение на якоре носит отрицательный характер, что в свою очередь приводит к уменьшению величины тормозного момента, развиваемого двигателем. В связи с этим при небольших нагрузках из-за недостаточности момента возникает неустойчивый режим и в конечном итоге образуется зона неприменимости противовключения, характеризуемая неустойчивой работой электропривода.

В этих условиях одним из технических решений для расширения рабочей области противовключения с целью ликвидации обнаруженной зоны неприменимости рассматриваемых генераторных режимов является использование реверса по цепи обмотки возбуждения. Исследования [7] показали, что при соответствующей модернизации схемы реверса быстродействие системы можно существенно повысить. В этом случае такой способ реверсирования становится весьма перспективным, в том числе для электропривода машин и механизмов с ограниченными габаритами, где размещение двухкомплектных тиристорных преобразователей в цепи якоря нежелательно.

Выводы

Таким образом, в результате теоретических исследований и имитационного моделирования генераторных режимов работы ТЭП ПТ для рассмотренных типов двигателей в условиях отсутствия токоограничивающих резисторов в цепи якоря:

- установлено, что для реализации управления скоростью в диапазоне, соответствующем анализируемым классам горных машин и механизмов, необходимо совместное использование рекуперативного

режима и режима противовключения;
 - определены рабочие области рекуперативного режима и режима противовключения;
 - обнаружено, что режим рекуперативного торможения реализуется в значительно более узком диапазоне изменения параметров электропривода, чем это следует из классической теории;

- жесткость механических характеристик во всем диапазоне скоростей в режиме противовключения значительно выше, чем в рекуперативном режиме, причем с увеличением мощности электропривода наблюдается повышение жесткости, характерное как для рекуперативного режима, так и для режима противовключения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эм Г.А. К вопросу о выборе генераторных режимов работы четырехквadrантного тиристорного электропривода постоянного тока // Тр. ун-та. Караганда: КарГТУ, 2005. № 4. С. 63-65.
2. Брейдо И.В., Эм Г.А. Особенности генераторных режимов работы четырехквadrантного тиристорного электропривода постоянного тока // Труды 4-й Международной науч.-техн. конференции «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях» (23-24 сентября 2004 г., г. Алматы). Алматы: АИЭС, 2004. С. 291-293.
3. Католиков В.Е., Динкель А.Д., Седунин А.М. Тиристорный электропривод с реверсом возбуждения двигателя рудничного подъема. М.: Недра, 1990. 382 с.
4. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1988. 344 с.
5. Парфенов Б.М., Кожиков О.И., Шиленков В.А. Электропривод буровых установок // Привод и управление. 2001. № 5. С. 8-15.
6. Каверин В.В., Эм Г.А. Генераторные режимы регулируемого электропривода горных машин // Труды XII Международной научной конференции «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030» (23-24 июня 2009 г.). Выпуск 2 / Министерство образования и науки РК, Карагандинский государственный технический университет. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2009. С. 225-227.
7. Брейдо И.В. Влияние реальных условий эксплуатации на структуру и параметры управляемых электроприводов нестационарных горных машин // Изв. ВУЗов. Горный журнал. 1993. № 8. С. 116-119.

ЭОЖ 621.31:004.4

АЙКЕЕВА А.А.

Электрэнергетика жүйелерін компьютерлік жобалаудың тәсілдері

Кәсіпорындардың ЭЖЖ жобалау міндеттері электр жүктемелерін дұрыс анықтау болып табылады. Электр жүктемелерінің маңызы бойынша жүйенің электр жабдықтарын тандайды және тексереді, қуат пен электр энергиясының шығындарын анықтайды.

Тұтынылатын электр энергиясы өсуінің ұлғаюы өнеркәсіптік кәсіпорындарды электрмен жабдықтау жүйелерін күрделілендіруге әкеліп соғады. Мұндай есептеулерді қолмен есептеуді жүргізу үлкен күрделілікті білдіреді, сондықтан электрмен жабдықтаудың нақты жүйесін есептеуді жылдамдату және ықшамдау үшін SR-0.1.0 программалық пакеті әзірленді.

Қазіргі уақытта энергия-техникалық жүйелерді және электр-жылуды жабдықтау жүйелерін жобалаушының еңбегін сол немесе өзге дәрежеде жеңілдету үшін тағайындалған, пакеттердің елеулі саны бар.

Мысал ретінде INPOSOFТ v 2.0 программасын қарастырамыз. Бұл электр тораптарын есептеу үшін жеткілікті қуатты пакет. Оның негізінде жүйені есептеу және негізгі электр жабдықтарын таңдау жүргізілетін, пайдалану коэффициентінің әдісі жатыр. Берілген жүйенің негізгі кемшілігі электр қабылдағыштарды есептеудің 1000В дейінгі кернеуге ғана жүргізілетіні болып табылады.

Тағы бір мысал ретінде, Электриктің Project Studio-сын қарастырайық, ол құрылыс объектілерін энергиямен жабдықтау жүйесін (ЭЖЖ) жобалауды автоматтандыру үшін тағайындалған және AutoCAD 2002/2004/2005/LT, Autodesk Building System 2004 немесе Autodesk Architectural Desktop 3.3/2004 ортасында жұмыс істейтін, ARX-қосымшаны білдіреді.

Бұл программалық орталарда, сондай-ақ ArchiCAD және Project Studio-да, ең алдымен, Электриктің Project Studio-сы торабының тікелей объектінің қосымша негізі бар жоспарламаларында салынуын қамтамасыз етеді, бұл әрі қарай есептеулер үшін тораптың қосымша моделін салу қажеттілігінен құтқарады. Бұдан басқа, AutoCAD ортасына шоғырланған «Элемент – коннектор» технологиясын пайдалану мүмкіндігі, кез келген күрделілікті электр тораптарын жылдам, ыңғайлы және көрнекті салуды орындауға мүмкіндік береді.

Берілген қосымшаның кемшіліктері мыналар болып табылады:

1) қосымшаның тек жоғарыда көрсетілген орталарда ғана жұмыс істеуі;

2) қосымшамен жұмыс істеуге оқытуға уақыттың көп жұмсалуды;

3) берілген қосымшаны сатып алудың қымбаттығы.

SR-0.1.0 пакетінің басқа ұқсас программалардан ерекшелігі қосалқы станциялар мен тұтынушылардың орналасқан жеріне, яғни олардың қайда, үстіңгі бетті немесе жер асты қазбаларында болатынына байланысты негізгі электр жабдықтарын таңдаудың универсалдылығы болып табылады.

Графикалық интерфейсті қолдану арқылы программалау ортасының негізінде меншікті программалық пакетті әзірлеу деректермен аса икемді операциялар жасауға және соңғы пайдаланушы үшін программамен жұмыс істеуді ықшамдауға мүмкіндік береді.

Жүйенің математикалық негізі ретінде ЭЖЖ пара-