

## ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Дмитрий Николаевич Афоничев  
Сергей Николаевич Пиляев  
Ирина Александровна Кекух

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Проблема автоматизации проектирования систем электроснабжения характеризуется неполнотой проектной информации на всех этапах разработки и многокритериальностью исходных требований. Проектируемая система должна отвечать как требованиям нормативных документов, так и требованиям экономического и эксплуатационного характера. Однако высокий уровень неопределенности, сопровождающий создание системы электроснабжения на всем протяжении процесса проектирования (от анализа технического задания до разработки проектной документации), не позволяет в полной мере применить точные математические методы. В настоящее время основным подходом к проектированию систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей являются субъективные знания и опыт проектировщика, которые всегда характеризуются неполнотой и фрагментарностью, что сказывается на качестве проектируемой системы. Одним из направлений изменения существующих подходов к проектированию систем электроснабжения является использование методов системной инженерии. Для разработки систем электроснабжения, в том числе сельскохозяйственных потребителей, используются САПР различных фирм, имеющие свои формы представления данных и функциональные свойства и выполняющие сравнительно небольшой ряд задач проектирования систем электроснабжения. Среди наиболее распространенных и перспективных можно назвать следующие: SIMARIS design фирмы Siemens; nanoCAD Электро фирмы Нанософт; программные продукты группы компаний CSoft. Основным недостатком всех перечисленных САПР является то, что они не позволяют определить стоимостные показатели. В настоящее время не существует программного комплекса, обеспечивающего сопровождение систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей на всем протяжении их жизненного цикла. Показана целесообразность разработки PLM-системы, позволяющей осуществить интеграцию САПР систем электроснабжения и оценить экономическую составляющую принимаемых проектных решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система электроснабжения, сельскохозяйственные потребители, автоматизация проектирования, программный комплекс, жизненный цикл системы.

## FEATURES OF COMPUTER-AIDED SYSTEM ENGINEERING OF POWER SUPPLY USED IN AGRICULTURE

Dmitriy N. Afonichev  
Sergey N. Pilyaev  
Irina A. Kekukh

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

The problem of computer-aided system engineering of power supply is characterized by the incompleteness of the design information at all stages of development and multicriteriality of basic data. The design system should meet the requirements of regulatory documents and various economic and operational requirements. Therefore, a high level of uncertainty that accompanies power supply system implementation over the whole period of design process (from analysis of specifications to design documentation) does not permit to take full advantage of exact mathematical methods. Thus, computer-aided system engineering of power supply can be realized on the basis of developers' personal knowledge and experience, which objectively can be insufficient and incompetent and insert influence on the quality of the designed system. One way to get around the problem is application of systems engineering methods. For the development of power systems, including those designated for agricultural consumers, usually professionals use CAD systems of different companies. Such systems have their own data representation and functional properties, and perform a relatively small number of tasks of designing of power supply systems. Among the most common and promising are the following: Siemens SIMARIS design; nanoCAD Electro of the Nanosoft company; software products of the CSoft group of companies. The main disadvantage of all these CAD systems is that consumers are unable to assess cost indicators. At present, there is no software solution supporting maintenance of power supply of agricultural consumers throughout their life cycle. The authors confirm expediency of the development of PLM system which enables implementing of integration of

power supply CAD systems and assessing economic component of the accepted design decisions.

KEY WORDS: power supply system, agricultural consumers, computer-aided design, software complex, lifecycle of the system.

### **В**ведение

Проектирование систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей является специфической задачей инженерного творчества. От проектировщика требуется не конструирование нового электротехнического изделия, а умение из готовых электротехнических устройств (трансформаторов, пусковой и защитной аппаратуры, кабелей, проводов и т.д.) создать целостную систему, удовлетворяющую заданным требованиям [4, 5, 7–10]. Сложность проектирования систем электроснабжения характеризуется, прежде всего, неполнотой информации на всех этапах разработки и многокритериальностью исходных требований. Проектируемая система должна отвечать как требованиям нормативных документов, так и требованиям экономического и эксплуатационного характера, предъявляемых к ней различными заинтересованными лицами [3], которые имеют характерные интересы и различные точки зрения на систему, которые выражаются в разных их представлениях о проектируемой системе. Поэтому высокий уровень неопределенности, сопровождающий создание системы электроснабжения на всем протяжении процесса проектирования (от анализа технического задания до разработки проектной документации) не позволяет в полной мере применить точные математические методы для решения задач автоматизированного проектирования системы электроснабжения. Таким образом, основным подходом к проектированию систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей являются субъективные знания и опыт проектировщика, которые всегда характеризуются неполнотой и фрагментарностью, что сказывается на качестве проектируемой системы.

### **Материал и методы**

Одним из направлений изменения существующих подходов к проектированию систем электроснабжения является использование методов системной инженерии [3, 6], поскольку системная инженерия представляет собой междисциплинарный подход и способы воплощения успешной системы любой природы.

Наиболее важным этапом процесса проектирования системы электроснабжения является этап разработки требований к системе, то есть описание ее как «черного ящика», учитывающее требование всех заинтересованных лиц. Обычно это либо спецификация, то есть точное формулирование параметра, либо условие, которое должно или может быть удовлетворено, или функция, которую нужно будет выполнить, или характеристика, которую нужно достигнуть. Так, например, требование минимальной стоимости системы электроснабжения накладывает свои требования на архитектуру системы (минимум аппаратуры, более низкое ее качество, уменьшение длины кабелей и проводов и т. д.).

Успешность разработки системы электроснабжения повышается использованием систем автоматизированного проектирования (САПР). Для управления жизненным циклом технических систем используется прикладное программное обеспечение PLM (product lifecycle management), которые являются интегратором, связывающим между собой различные локальные системы компьютерного проектирования CAD (computer-aided design) [2]. Информация об объекте, содержащаяся в PLM-системе, является цифровым макетом этого объекта. Достоинством PLM-системы является то, что она обеспечивает управление всей информацией об объекте и связанных с ним процессах на протяжении всего его жизненного цикла, начиная от проектирования и изготовления до ликвидации. К сожалению, подобного программного продукта для нужд проектирования электроснабжения пока не разработано.

Для разработки систем электроснабжения, в том числе сельскохозяйственных потребителей, используются САПР различных фирм, имеющие свои формы представления данных и функциональные свойства и выполняющие сравнительно небольшой

ряд задач проектирования систем электроснабжения. Среди наиболее распространенных и перспективных можно назвать следующие:

- SIMARIS design фирмы Siemens;
- nanoCAD Электро фирмы Нанасофт;
- программные продукты группы компаний CSoft.

### **Результаты и их обсуждение**

SIMARIS design – программный пакет для разработки систем энергораспределения промышленных, жилых и нежилых зданий [2], это инновационные программные средства, которые представляют собой эталонные решения для проектирования распределительных и внутренних электрических сетей. Данный программный пакет включает инструменты проектирования, конфигурации и поддержки, вспомогательные и интерфейсные средства. Пакет SIMARIS design обеспечивает построение расчетной однолинейной схемы системы электроснабжения и автоматический выбор пускозащитной аппаратуры, обеспечивающей полную селективность защиты и соблюдение нормативных требований к электроснабжению [1]. Основным недостатком данного программного продукта является то, что выбирается аппаратура только производства фирмы Siemens.

Программный продукт nanoCAD Электро может быть использован для проектирования силового электрооборудования, внутреннего и наружного искусственного освещения производственных и гражданских зданий. Функциональные возможности nanoCAD Электро позволяют инженеру-разработчику выполнять только решение концептуальных вопросов, освободив его от рутинной работы: маркировки оборудования, громоздких расчетов, определения потребности в оборудовании, материалах, покупных изделиях и сведения результатов в спецификации, ведения кабельного журнала, формирования принципиальных схем электрической сети. При этом риск возникновения ошибок в проектной документации, вызванных «человеческим фактором», является минимальным. Использование программного продукта nanoCAD Электро обеспечивает повышение качества проектов и производительности труда разработчиков.

Собственное графическое ядро делает nanoCAD Электро самостоятельной САПР, не зависящей от графических программ. Имеющаяся в nanoCAD Электро поддержка формата DWG (от drawing (чертеж) – бинарный формат файла, используемый для хранения двухмерных и трехмерных проектных данных и метаданных) обеспечивает беспрепятственный обмен информацией с другими разработчиками (субподрядчиками) и заказчиками. Программный продукт nanoCAD Электро решает такие основополагающие задачи проектирования систем электроснабжения, как расчет освещенности и расстановка осветительных приборов в помещениях; размещение силового электрооборудования; трассировка и прокладка кабельных линий; определение уставок защитных аппаратов и сечений кабелей; оформление проектной документации.

Достоинства nanoCAD Электро:

- собственное графическое ядро;
- понятный интерфейс;
- встроенный «Менеджер проекта»;
- большой спектр различных настроек, позволяющий организовать проектные работы в полном соответствии со стандартами организации и особенностями разрабатываемых проектов;
- возможность автоматической маркировки оборудования и кабелей по настраиваемой маске, а также ручного заполнения технического задания и его импорта из обменного файла XML (eXtensible markup language – расширяемый язык разметки);
- разработка вариантов электрической сети на нескольких планах и сохранение связей между ними;
- моделирование силовой и контрольной электрической сети;

- наличие таких приложений, как «Мастер проверок» (контролирует качество построения электрической сети, выбор оборудования и кабелей) и «Менеджер баз данных» (осуществляет управление данными в базах данных системы).

Кратко проанализируем процесс разработки системы электроснабжения в программе nanoCAD Электро. Посредством специальных инструментов разработчик создает модель проекта, составляет план расположения оборудования и прокладки кабельных линий. Программа nanoCAD Электро реализует в автоматическом режиме все необходимые расчеты, разработчик выбирает сечения кабелей и уставки защитных аппаратов, а программа производит проверки. После этого вся проектная документация (кроме плана) формируется автоматически.

Работу в nanoCAD Электро начинают с открытия окна «Менеджер проекта», в котором находятся средства управления документами разрабатываемого проекта (создание, удаление, подключение, предварительный просмотр, редактирование и т. д.), а также базами данных оборудования. Менеджер проекта обеспечивает хранение проектных документов и быстрый доступ к ним. В nanoCAD Электро используется разделение баз данных на базу данных проекта и базы данных приложения, которых может быть много, их можно формировать по производителям и видам оборудования. Необходимое оборудование свободно перемещается из баз данных приложения в базу данных проекта, указанную процедуру осуществляет «Менеджер баз данных».

Модель электрической сети создается оформлением плана расположения оборудования и прокладки кабельных линий на предварительно созданной архитектурной подоснове. Посредством специальных инструментов разработчик расставляет на плане оборудование, «подсоединяет» электроприемники к распределительным устройствам, прокладывает кабельные линии. После этого производится окончательное оформление плана. Команды «Атрибуты», «Выноска» и «Спец. выноска» позволяют проставить выноски к оборудованию, кабельным линиям, помещениям.

Расстановка оборудования выполняется с использованием окна «База УГО (условные графические обозначения)», где для удобства разработчиков все УГО разделены на группы. База УГО открыта для редактирования и хранится в DWG-файле.

Модель электрической сети, сформированная на плане, отображается в окне «Электротехническая модель», которое обеспечивает необходимые расчеты, выбор уставок защитных аппаратов, параметров кабелей.

Программа nanoCAD Электро реализует следующие расчеты:

- потерь напряжения; внутреннего электрического освещения по коэффициенту использования; электрических нагрузок по РТМ 36.18.32.4-92, СП 31-110-2003;
- токов короткого замыкания по ГОСТ 28249-93, «петля фаза-ноль»;
- токов утечки через изоляцию согласно ПУЭ 7 (п. 7.1.83).

Качество разработки электрической сети и выбора оборудования контролирует модуль проверок и информирует разработчика об ошибках.

Существенным недостатком nanoCAD Электро является то, что выбор типов и уставок пускозащитной аппаратуры осуществляется самим проектировщиком по результатам расчета электротехнической модели, что может привести к нарушению селективности защиты элементов системы электроснабжения [1].

Группа компаний CSoft разрабатывает и поставляет программное обеспечение САПР, позволяющее реализовать всю технологическую цепочку проектирования электрической части для производственных объектов, в том числе для таких специфических, как системы электроснабжения собственных нужд тепловых и атомных электростанций [2]. Основными программными модулями являются следующие продукты.

Программа AutomatiCS обеспечивает автоматизацию проектирования систем контроля и управления, учета электроэнергии. AutomatiCS – многопользовательская САПР, поддерживающая все этапы проектных работ от получения технического зада-

ния на разработку автоматизированной системы контроля (управления) до проектного решения и оформления документации. Использование AutomatiCS в практике проектных работ обеспечивает повышение качества проектов, сокращение сроков выполнения проектных работ и снижение количества ошибок в проектной документации. В AutomatiCS реализовано многократное использование данных уже разработанных проектов. Поддерживается одновременная работа нескольких разработчиков с одним проектом, чему способствует многопользовательский доступ к проектным данным, а также к базе данных технических средств и типовых проектных решений.

Программный пакет ElectriCS 3D используется для автоматизированной трассировки кабелей различного назначения в зданиях и на открытых площадках. Оригинальные технологии ElectriCS 3D позволяют обеспечить качество проектной документации за счет снижения количества ошибок, неизбежных при неавтоматизированном проектировании; сокращение расхода кабеля и защитных труб; повышение производительности труда проектировщиков; сокращение сроков проектирования и расходов на строительство и эксплуатацию инженерных коммуникаций.

Программный комплекс ElectriCS ADT – это САПР систем электроснабжения различных предприятий. ElectriCS ADT обеспечивает автоматизированный выпуск следующих документов:

- однолинейных принципиальных схем внутренних и распределительных электрических сетей в традиционном вертикальном (графическом) представлении, а также в горизонтальном (табличном);
- общих видов электрощитов; перечней составных частей к ним;
- заказных спецификаций оборудования, материалов, изделий;
- матриц нагрузок, потерь напряжения, токов короткого замыкания;
- кабельных журналов.

Пакет ElectriCS Light выполняет светотехнические расчеты и применяется при разработке систем электрического освещения предприятий. Средства ElectriCS Light позволяют производить расчеты внутреннего освещения помещений и наружного освещения производственных площадок. К существенным преимуществам пакета ElectriCS Light, отличающим его от аналогичных САПР, можно отнести:

- расчет освещенности с использованием кривых силы света светильников (с отслеживанием затенений и отражений);
- возможность получения сводного результата при расчетах множества помещений, просмотра в трехмерном изображении результатов расчета световых полей, что дает возможность разработчику оценить распределение освещенности по площади освещаемой территории; получения готовой проектной документации в форматах AutoCAD и Microsoft Word.

Программный комплекс ElectriCS Storm выполняет автоматизированное проектирование молниезащиты и заземления объектов капитального строительства. ElectriCS Storm включает четыре подсистемы расчета: заземляющих устройств; подстанций; электромагнитной обстановки; молниезащиты.

Программа EnergyCS Потери выполняет расчеты потерь электрической энергии при передаче по сетям. В программе реализуются следующие расчеты:

- установившихся режимов (средних нагрузок и для заданного часа графика энергопотребления);
- потерь электроэнергии по фидерам для разомкнутых участков сети;
- потерь электроэнергии в сложнзамкнутой сети методом обобщенных типовых графиков;
- потерь электроэнергии во внутренних сетях на основе обобщенных показателей;
- потерь электроэнергии в произвольных сетях методом прямого численного интегрирования на основе почасовых расчетов по графикам энергопотребления;
- постоянных потерь и потерь на собственные нужды;

- балансов электроэнергии по районам;
- потерь в результате погрешностей измерительного оборудования.

Программа EnergyCS Режим используется для выполнения расчетов установившихся режимов электрических систем и решения смежных задач. Задачи, решаемые EnergyCS Режим:

- расчет установившихся режимов (определение потоков мощности и токов в элементах сети, напряжений в ее узлах);
- оценка устойчивости методом последовательных утяжелений;
- анализ качества напряжения по его отклонению на основе почасовых расчетов по суточным графикам нагрузок;
- анализ балансов мощности по районам и подрайонам электрических сетей;
- расчет перспективных режимов с учетом развития сетей, коэффициентов роста нагрузок;
- оформление результатов на схеме с обозначением существующего, нового и демонтированного оборудования.

Программный продукт EnergyCS ТКЗ предназначен для расчета токов короткого замыкания. Достоинства EnergyCS ТКЗ:

- проведение множества расчетов при проектировании сетей любой сложности;
- наличие встроенного графического редактора с базой обозначений элементов схем;
- ввод данных в графическом виде и использование справочной базы оборудования; представление параметров расчетной модели и результатов в графическом и табличном виде;
- малый риск ошибок при определении параметров схем замещения; интеграция в САПР с любым графическим ядром.

Программный комплекс EnergyCS Line реализует автоматизированное проектирование механической части воздушных линий электропередачи (ЛЭП), волоконно-оптических линий связи, подвешиваемых на опорах воздушных линий, гибких ошинок открытых распределительных устройств электрических станций и подстанций. EnergyCS Line обеспечивает решение следующих задач: расстановка опор ЛЭП по трассе с учетом пересечений и зон запрета; расчет таблицы монтажных тяжений и стрел провеса проводов, грозозащитного троса и волоконно-оптического кабеля; оценка необходимости установки гасителей вибрации и расчет точек их креплений на проводе и на грозозащитном тросе; вычисление нагрузки на подвес провода для оценки устойчивости подвесных гирлянд изоляторов; установление нормативных и расчетных нагрузок на опоры, создаваемых весом провода, его тяжением и давлением ветра, для оценки нагрузочной способности опор и проектирования их фундаментов; разработка ведомостей оборудования, в том числе общей ведомости для формирования заказных спецификаций.

Программный комплекс EnergyCS Электрика – система электротехнических расчетов при проектировании внутренних и распределительных электрических сетей, в нем сочетаются удобный интерфейс и комплексный подход для расчета режимов разомкнутых внутренних и распределительных сетей. EnergyCS Электрика используется для проектирования внутренних электрических сетей различных предприятий, распределительных сетей, систем электроснабжения собственных нужд электрических станций и подстанций, для разработки технических условий на подключение новых потребителей к источникам электроэнергии, а также для оперативного контроля и анализа возможных режимов электрических сетей.

Основным недостатком всех перечисленных САПР систем электроснабжения является то, что они не позволяют определить один из основных показателей проектируемой системы электроснабжения, а именно, ее стоимостные показатели.

### Выводы

Для разработки систем электроснабжения, в том числе сельскохозяйственных потребителей, используются САПР различных фирм, имеющие свои формы представления данных и функциональные свойства и выполняющие сравнительно небольшой ряд задач проектирования систем электроснабжения.

В настоящее время не существует программного комплекса, обеспечивающего сопровождение систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей на всем протяжении их жизненного цикла.

Целесообразна разработка PLM-системы, позволяющей осуществить интеграцию САПР систем электроснабжения и оценить экономическую составляющую принимаемых проектных решений.

### Библиографический список

1. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учебник для вузов / В.А. Андреев. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2006. – 639 с.
2. Афоничев Д.Н. Информационные технологии в науке и производстве : учеб. пособие / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пилаев, И.И. Аксенов. – Воронеж : Воронежский ГАУ, 2015. – 140 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа (из интрасети ВГАУ): – <URL: <http://catalog.vsau.ru/elib/books/b107291.pdf>> (дата обращения: 23.05.2016).
3. Батоврин В.К. Стандарты системной инженерии: серия докладов (зеленых книг) в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации» / В.К. Батоврин; под ред. М.С. Липецкой, К.А. Ивановой. – Санкт-Петербург : Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад». – 2012. – Вып. 4. – 64 с.
4. Герасименко А.А. Передача и распределение электроэнергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. – 715 с.
5. Коробов Г.В. Электроснабжение. Курсовое проектирование : учеб. пособие / Г.В. Коробов, В.В. Картацев, Н.А. Черемисинова. – 3-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2014. – 192 с.
6. Левенчук А.И. Системноинженерное мышление : учебник / А.И. Левенчук. – Москва : Изд-во МФТИ, 2015. – 305 с.
7. Лещинская Т.Б. Электроснабжение сельского хозяйства : учебник / Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов. – Москва : БИБКОН, ТРАНСЛОГ, 2015. – 656 с.
8. Фадеева Г.А. Проектирование распределительных электрических сетей : учеб. пособие / Г.А. Фадеева, В.Т. Федин; под общ. ред. В.Т. Фелина. – Минск : Вышэйшая школа, 2009. – 365 с.
9. Фролов Ю.М. Основы электроснабжения : учеб. пособие / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 432 с.
10. Черемисинова Н.А. Проектирование систем электрификации / Н.А. Черемисинова, Д.Н. Афоничев. – Воронеж : Воронежский ГАУ, 2015. – 150 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8 (473) 253-75-35, E-mail: [et@agroeng.vsau.ru](mailto:et@agroeng.vsau.ru).

Сергей Николаевич Пилаев – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8 (473) 253-75-35, E-mail: [et@agroeng.vsau.ru](mailto:et@agroeng.vsau.ru).

Кекух Ирина Александровна – ведущий инженер кафедры электрификации сельского хозяйства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8 (473) 253-63-02, E-mail: [elf222@agroeng.vsau.ru](mailto:elf222@agroeng.vsau.ru).

Дата поступления в редакцию 13.09.2016

Дата принятия к печати 20.09.2016

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Dmitriy N. Afonichev – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 253-75-35, E-mail: [et@agroeng.vsau.ru](mailto:et@agroeng.vsau.ru).

Sergey N. Pilyaev – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 253-75-35, E-mail: [et@agroeng.vsau.ru](mailto:et@agroeng.vsau.ru).

Irina A. Kekukh – Leading Engineer, the Dept. of Electrification in Farming, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 253-63-02, E-mail: [elf222@agroeng.vsau.ru](mailto:elf222@agroeng.vsau.ru).

Date of receipt 13.09.2016

Date of admittance 20.09.2016