

И.А. Бершадский /д.т.н./, А.В. Згарбул /к.т.н./, И.И. Мазуров
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

РАСЧЕТ ЗОН ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ МНОГОКРАТНЫМИ СТЕРЖНЕВЫМИ МОЛНИЕПРИЁМНИКАМИ

Представленное Web-приложение «Расчет молниезащиты многократными стержневыми молниеотводами» призвано упростить и оптимизировать расчёт зон молниезащиты, образованной многократными молниеотводами, восполнить пробел между уже существующими сервисами, имеющими ограниченный функционал и специализированными коммерческими программами. Реализована возможность расчёта разноразмерных зон защиты многократными стержневыми молниеприёмниками, автопроверка защищенности объекта, деление защищаемого объекта на зоны для расчёта защиты на выбранных уровнях, вычисление минимизированной высоты молниеприёмника в автоматическом режиме.

Ключевые слова: молниезащита, стержневой молниеприёмник, многократный молниеотвод, зона защиты, программное обеспечение.

Постановка проблемы

С ростом глобального потепления усиливается грозовая активность, поэтому тематика молниезащиты становится всё более актуальной. Появление новых технологий, которым требуется защита от молний, стимулирует исследование проблемы молниезащиты намного шире, нежели это происходило раньше [1].

Полный комплекс мер молниезащиты наземных объектов подразумевает сочетание систем защиты внешней – от прямых ударов молнии и внутренней – устройства защиты от вторичных воздействий (наводок и импульсного перенапряжения). Внешняя молниезащита обеспечивает минимальный шанс прямого попадания молнии в сооружение, защищая тем самым его от повреждений. Она берёт на себя удар молнии, который затем отводится в грунт.

Простота устройств, отсутствие необходимости в специальном техническом обслуживании и сравнительно надёжная защита объекта от поражения ударами молнии, обеспечили молниеприёмникам пассивной системы молниезащиты наиболее широкое распространение на практике [2].

Стержневые молниеотводы являются, как правило, основными элементами молниезащиты распределительных устройств электростанций и подстанций различных классов напряжений. Сам молниеотвод – это устройство, высота которого много больше высоты защищаемого объекта и через которое ток молнии отводится в землю, обходя защищаемый объект [3].

Объекты энергетики состоят как правило из крупных зданий или нескольких сооружений, занимающих значительную территорию, при

проектировании молниезащиты которых невозможно обойтись без применения многократных молниеотводов, использование комбинаций которых, значительно увеличивают зону защиты.

Ручной расчёт подобных объектов, требует большого количества времени и учёта многих факторов при проектировании. По этой причине для решения таких задач с целью получения максимально быстрого, обоснованного, достоверного и сбалансированного результата, целесообразно использовать компьютерные технологии и специализированное программное обеспечение.

Использование специализированного программного обеспечения обязывает учитывать множество факторов, значительно усложняющих процесс проектирования:

- требовательность к наличию инженерных знаний и навыкам моделирования;
- для расчёта молниезащиты программа требует наличие 3-х мерной модели объекта;
- софт представляют собой полноценные дистрибутивы требующие установки;
- ручной подбор оптимальной высоты молниеприёмника.

Немаловажным фактором является то, что подобное ПО имеет, как правило, коммерческий характер, что для рядового пользователя становится непреодолимым препятствием.

Помимо этого, существуют онлайн-сервисы, которые имеют ограниченный, примитивный функционал, который в целом сводится к элементарному расчёту параметров по эмпирическим формулам, взятых из нормативных документов, и построению зон одиночных молниеотводов для одного прямоугольного равновысокого объекта.

Таким образом, каждое из существующих на сегодняшний день программных решений заставляет пользователя идти на компромисс. Ограниченный функционал либо профессиональное коммерческое решение.

Анализ последних исследований и публикаций

Современная молниезащита является весьма надежной, хотя и не может на 100% гарантировать сохранение оборудования после удара молнии. Но по статистике большая часть повреждений происходит из-за проблем с установкой и обслуживанием молниезащиты, а не из-за ее неэффективности.

Проблемы при проектировании молниезащиты сводятся к отсутствию полноценного универсального документа по организации системы молниезащиты.

На практике каждая из существующих методик имеет свой ряд неточностей, недочётов, которые не дают ответов на все нюансы проектировщику молниезащиты. Таким образом, единственным решением во избежание недочётов при проектировании и строительстве молниезащиты напрашивается унифицирование и объединение методик в одном более современном документе.

В настоящее же время с целью обеспечения единства требований при проектировании молниезащиты целесообразно изучить все имеющиеся документы.

Согласно СО 153–34.21.122-2003 [4] электростанции и подстанции относят к специальным объектам с ограниченной опасностью, минимально допустимый уровень надежности защиты от прямых ударов молнии (ПУМ) устанавливается в пределах 0,9 - 0,999 в зависимости от степени его общественной значимости и тяжести ожидаемых последствий от прямого удара молнии по согласованию с органами государственного контроля.

Важным аспектом является и определении наиболее выгодного исполнения элементов молниезащиты. Необходимо делать технико-экономическое обоснование, а также уделять внимание возможному ущербу на объектах от ударов молнии. Основываясь на приведённых фактах сравнения, наиболее предпочтительнее оказывается, как правило, расположение стержневых молниеотводов на самих конструкциях и присоединение их к общему заземляющему устройству всей подстанции, а применение отдельно стоящего молниеотвода с независимым контуром заземления рекомендуется применять в случаях, когда первый способ не в полной мере

обеспечивает достаточную грозоупорность [5].

Таким образом экономический вопрос при выборе молниеприёмников включает в себя выбор оптимального количества, конструктивного исполнения и расположения молниеприёмников.

Обращение к рекомендуемым на сегодняшний день нормативным документам при проектировании молниезащиты, таким как СО-153-34-21.122-2003, не решает проблему. В разделе 3.3.1, можно лишь найти рекомендацию воспользоваться компьютерными программами, которые должны произвести точный расчёт зон молниезащиты при использовании стержневого и тросового молниеприёмника либо комбинации из нескольких таких устройств.

На сегодняшний день, пока нет ещё в непосредственной доступности столь удобных и точных компьютерных программ.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка Web-приложения, которое займёт место между сервисами, имеющими ограниченный функционал и профессиональными коммерческими программами. Использование приложения позволит пользователю избавиться от компромисса и оптимизирует организацию молниезащиты при проектировании зон многократных молниеприёмников специальных объектов.

При разработке приложения решались следующие задачи:

- реализовать возможность расчёта зоны защиты многократными стержневыми молниеприёмниками;
- автопроверка защищенности объекта;
- реализовать возможность произвольного расположения стержневых молниеприёмников на плане;
- реализовать деление защищаемого объекта на зоны для расчёта защиты на выбранных уровнях;
- вычисление минимизированной высоты молниеприёмника в автоматическом режиме.

Основной материал исследования

1. Описание программного комплекса.

Web-приложение может найти практическое применение среди пользователей, благодаря легкости применения и наличию отличительного функционала:

- построение зоны защиты многократными молниеотводами (количество 2, 4 или 6);
- отсутствие необходимости наличия 3-х мерной модели объекта;
- автоматическая проверка объекта на защищенность;

- получение минимизированной высоты молниеприёмника;
- возможность разделить объект на зоны различной высоты;

Работа программы по расчёту защитных зон стержневых молниеотводов, осуществляется по следующему алгоритму (рис. 1).

К исходным данным для вычислений параметров зоны защиты, требуемых к вводу, относятся (рис. 2):

- выбор требуемого уровня надёжности от ПУМ (устанавливается по согласованию с органами государственного контроля в зависимости от степени его общественной значимости и тяжести ожидаемых последствий от прямого удара молнии);

Уровень надёжности защиты от прямых ударов молнии:

- координаты молниеприёмников;
- количество молниеприёмников (доступное количество молниеотводов, регулируется пользователем. Актуальным количеством для защиты ОРУ является использование четырёх и более молниеотводов. Актуальность такого количества объясняется тем, что зона защиты четырёх молниеотводов значительно превышает сумму зон защиты одиночных молниеотводов. Возможен выбор вариантов создания зоны из 2, 4 или 6 молниеприёмников, в зависимости от исходной конфигурации защищаемого объекта);

– предварительная высота молниеотвода (определённые молниеотводы и их заданная высота призваны построить зону защиты на требуемой высоте. Правильный выбор высоты молниеотвода позволит минимизировать затраты на металл, при этом обеспечив достаточную зону защиты и надёжность объекта от поражения молнией).

- координаты защищаемого объекта - рис. 3 (на основе введенных координат, определяется геометрия и выполняется построение защищаемого объекта. Приложение позволяет разделить объект на три размерные зоны, как особо характерных для ОРУ, что даст возможность визуаль-

но обозначить отдельные части защищаемого объекта):

- высота защищаемого объекта.

Параметр определяет высоту, каждой из размерных зон, что позволит получить зону защиты на желаемой заданной высоте.

Расчёты выполняются в соответствии с «Инструкцией по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций» СО 153–34.21.122-2003.

К данным, на основе которых выполняется построение зоны защиты относятся (рис. 4): высота зоны h_0 ; радиус зоны на уровне земли и высоте защищаемого объекта; рекомендуемая высота молниеотвода.

Перечень параметров является минимальным и достаточным для построения и определения геометрии зоны защиты.

Программа заканчивается сообщением о допущенных ошибках и комментариями к ним, а также даёт заключение о защищенности объекта. Для ее осуществления применяются языки HTML5 и JavaScript. Для графических построений – элемент `<canvas>`.

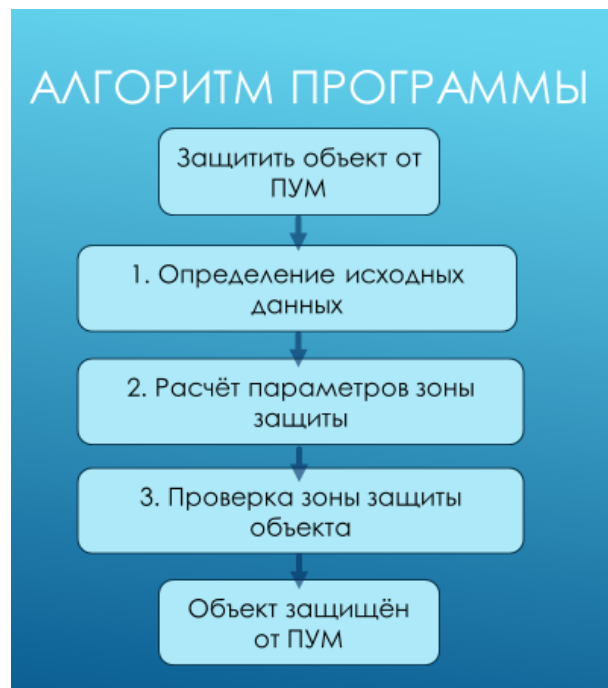


Рис. 1. Алгоритм Web-приложения

Количество молниеотводов:

Молниеприемники	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
X (м):	<input type="text" value="3,5"/>	<input type="text" value="3,5"/>	<input type="text" value="31,25"/>	<input type="text" value="31,25"/>
Y (м):	<input type="text" value="26"/>	<input type="text" value="6"/>	<input type="text" value="6"/>	<input type="text" value="26"/>
Высота (м, <150):	<input type="text" value="11,5"/>			

Рис. 2. Выбор количества и расположения молниеотводов

Количество зон защищаемых объектов:

Зоны	Зона 1	Зона 2	Зона 3
x1 (м):	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="3,5"/>	<input type="text" value="31,25"/>
x2 (м):	<input type="text" value="38,5"/>	<input type="text" value="31,25"/>	<input type="text" value="36,75"/>
y1 (м):	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="5,5"/>	<input type="text" value="5,5"/>
y2 (м):	<input type="text" value="32"/>	<input type="text" value="26,5"/>	<input type="text" value="26,5"/>
Высота здания hx (м):	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="5,5"/>	<input type="text" value="5"/>

Рис. 3. Определение геометрических параметров защищаемого объекта

Выходные данные

Расстояние между стержневыми молниеприемниками L (м):	<input type="text" value="34.2"/>
Предельное расстояние между стержневыми молниеприемниками Lmax (м):	<input type="text" value="66.12"/>
Высота зоны h0 (м):	<input type="text" value="9.77"/>
Высота провеса hc (м):	<input type="text" value="8.34"/>
Радиус зоны на уровне земли (м):	<input type="text" value="13.8"/>
Радиус зоны gx1 на уровне высоты hx1 (м):	<input type="text" value="10.97"/>
Радиус зоны gx2 на уровне высоты hx2 (м):	<input type="text" value="6.03"/>
Радиус зоны gx3 на уровне высоты hx3 (м):	<input type="text" value="6.74"/>
Рекомендуемая высота молниеотвода, не менее (м):	<input type="text" value="11.31"/>
<input type="button" value="Применить"/>	

ЗДАНИЯ ЗАЩИЩЕНЫ

Рис. 4. Результаты расчёта по Web-приложению

2. Проверка зоны защиты объекта

Автоматическая проверка защищенности зоны осуществляется на программном уровне. Для получения максимально точного результата о защищенности объекта после расстановки молниеотводов выбирается и рассчитывается каждая из зон в отдельности. Площадь каждой зоны подстанции делится на участки 10×10 и представляет собой сетку (рис. 5). Проверка всех ячеек сетки на предмет защищенности осуществляется от каждой пары молниеотводов. Сетка, ячейки которой находятся в зоне действия защи-

ты хотя бы одной из пар молниеотводов, считается защищенной, а значит и оборудование, расположенное в этой зоне тоже защищено. Далее программа переходит к проверке следующей зоны на предмет защищенности. Если какая-либо ячейка сетки не попала в зону защиты, программа сообщает о незащищенности объекта, и предлагает в автоматическом режиме рекомендуемую высоту молниеотвода. Расчет высоты происходит путём её наращивания в итерационном процессе, что позволяет получить минимизированную высоту молниеотвода.

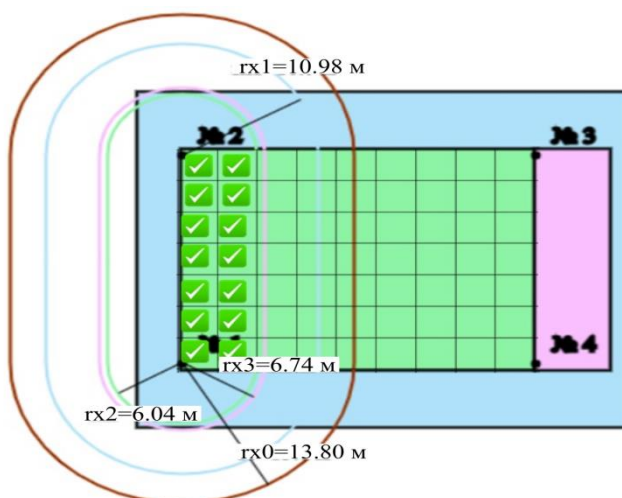


Рис. 5. Реализация автоматической проверки защищенности

Построение зоны защиты

Выберите пару молниеотводов, для которых рисовать защитную зону:

2 и 4 v

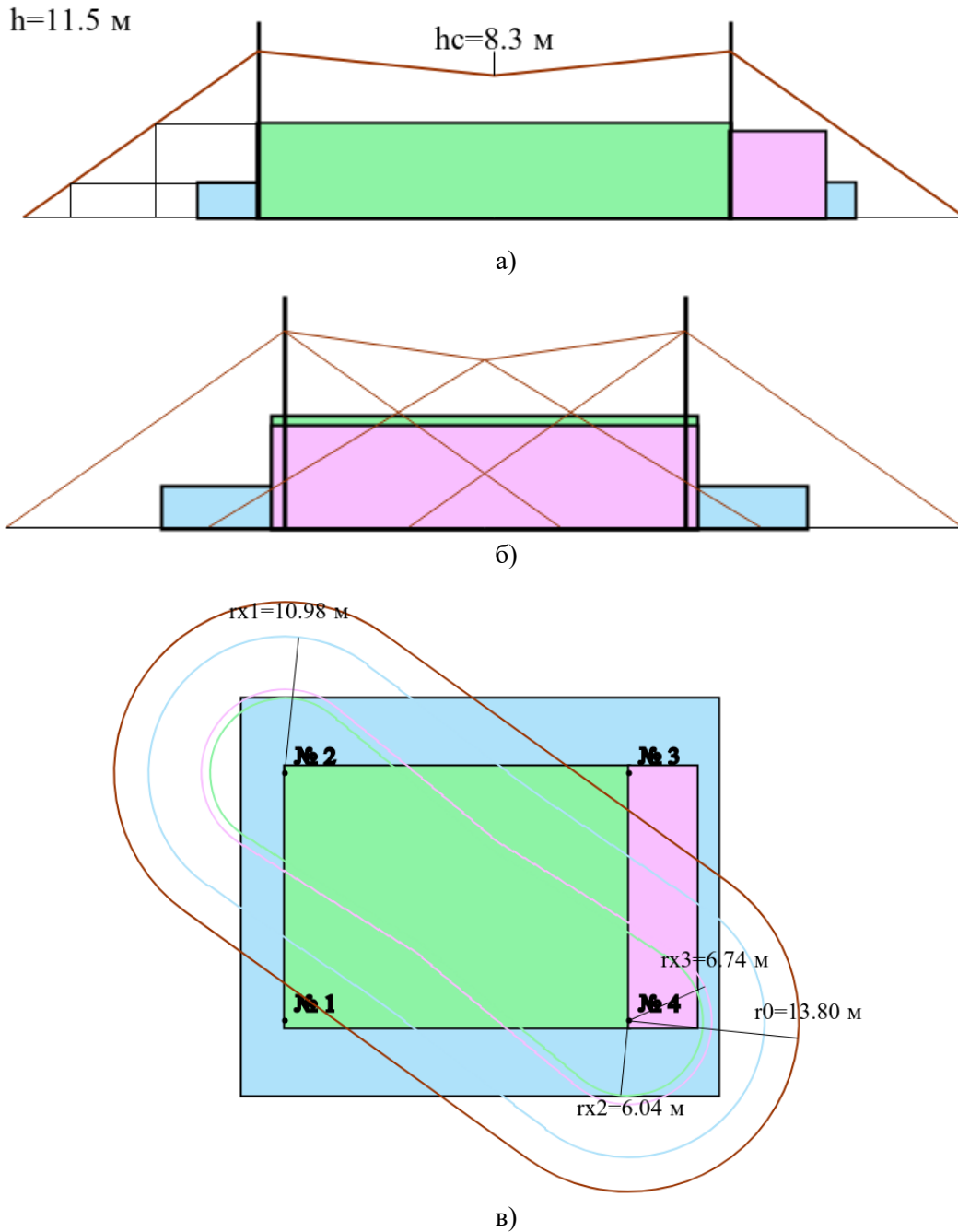


Рис. 6. Построение зоны защиты объекта:
 а – вид спереди; б – вид сбоку; в – вид сверху

3. Построение геометрии защищаемого объекта и зоны защиты по вычисленным данным.

Приложение отображает три вида на защищаемый объект: вид спереди, вид сбоку и вид сверху. Каждая зона, определённая пользователем на начальном этапе, отображается соответствующим цветом. Функционал приложения позволяет пользователю самостоятельно вы-

брать пару молниеотводов, для возможности визуально изучить область защиты, обеспечивающую выбранными молниеотводами (рис. 6).

4. Расчёт более сложных конфигураций ОРУ

Web-приложение «Расчет зон молниезащиты многократными стержневыми молниеотводами» позволяет рассчитывать молниезащиту и более сложных ОРУ, конфигурация которых нестан-

дартна, защиту которых можно осуществить более чем 4-мя молниеприёмниками.

Например, для защиты ОРУ-110/35 кВ зоны предлагается расположить следующим образом – рис. 7.

Алгоритм программы позволяет, в дальнейшем расширить функционал программы, и расширить построение зон защиты для 8-ми, 10-ти и большего количества молниеприёмников.

Чтобы убедиться в корректности работы приложения выполним расчет зон молниезащиты ОРУ с надёжностью 0,9, построим зону защиты, определим количество и высоту молниеприёмников.

Пример. ОРУ подстанции имеет следующие габаритные размеры: высота наиболее высокого объекта составляет $h_x=5,5$ м, ширина $b=32$ м,

длина $a=38,5$ м. Расстояние между ближними молниеотводами $l_1=20$ м, между удалёнными $l_2=27,75$ м (рис. 8). Зона 1 определена шириной и длиной всего защищаемого объекта с высотой равной 2 м. Зоны 2 и 3 делят и визуально обозначают отдельные части защищаемого объекта и имеют высоту 5,5 м.

В результате расчета защиты ОРУ при выбранном расположении молниеприёмников требуется 4 молниеотвода высотой 11,31 м для обеспечения молниезащиты с надёжностью 0,9 от прямого удара молнии (рис. 8).

Корректность работы приложения по примеру была проверена путём сравнения результатов, полученных при расчёте другими доступными инструментами на различных уровнях надёжности (табл. 1)

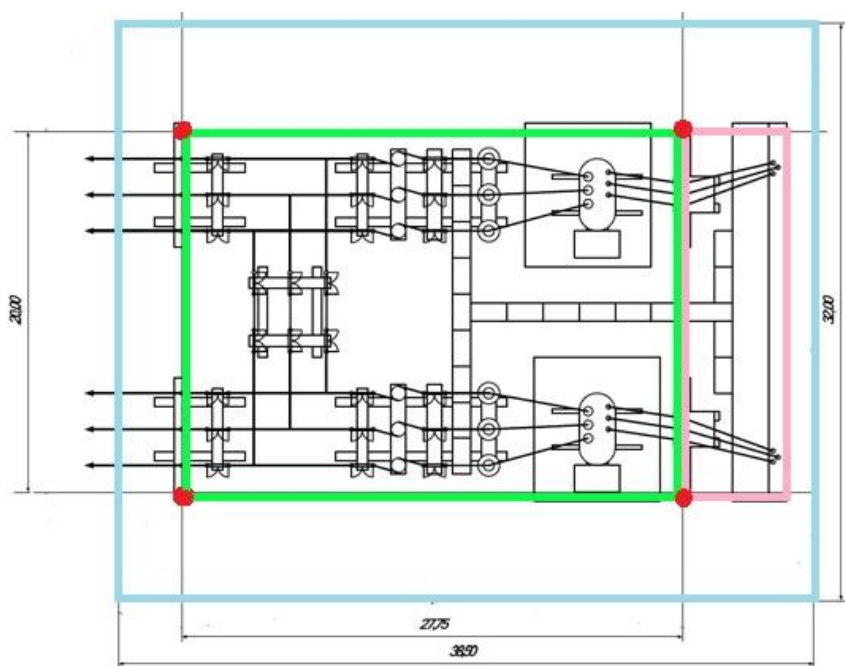


Рис. 8. Пример деления объекта на зоны

Табл. 1. Сравнение результатов, полученных при расчёте различными инструментами

Высота молниеотвода	Программа расчёта по методу СО	Надёжность	Оценка защищенности
$h=11,5$ м	Ручной расчёт	0,9	Объект защищен
$h=14,3$ м		0,99	Объект защищен
$h=18,6$ м		0,999	Объект защищен
$h=11,5$ м	Web-приложение	0,9	Объект защищен
$h=14,3$ м		0,99	Объект защищен
$h=18,6$ м		0,999	Объект защищен
$h=11,5$ м	Программа «ЗУМ» [6]	0,9	Объект защищен
$h=14,3$ м		0,99	Объект защищен
$h=18,6$ м		0,999	Объект защищен
$h=11,5$ м	Программа ZANDZ [7]	0,987	Объект защищен
$h=14,3$ м		0,9986	Объект защищен
$h=18,6$ м		0,99986	Объект защищен

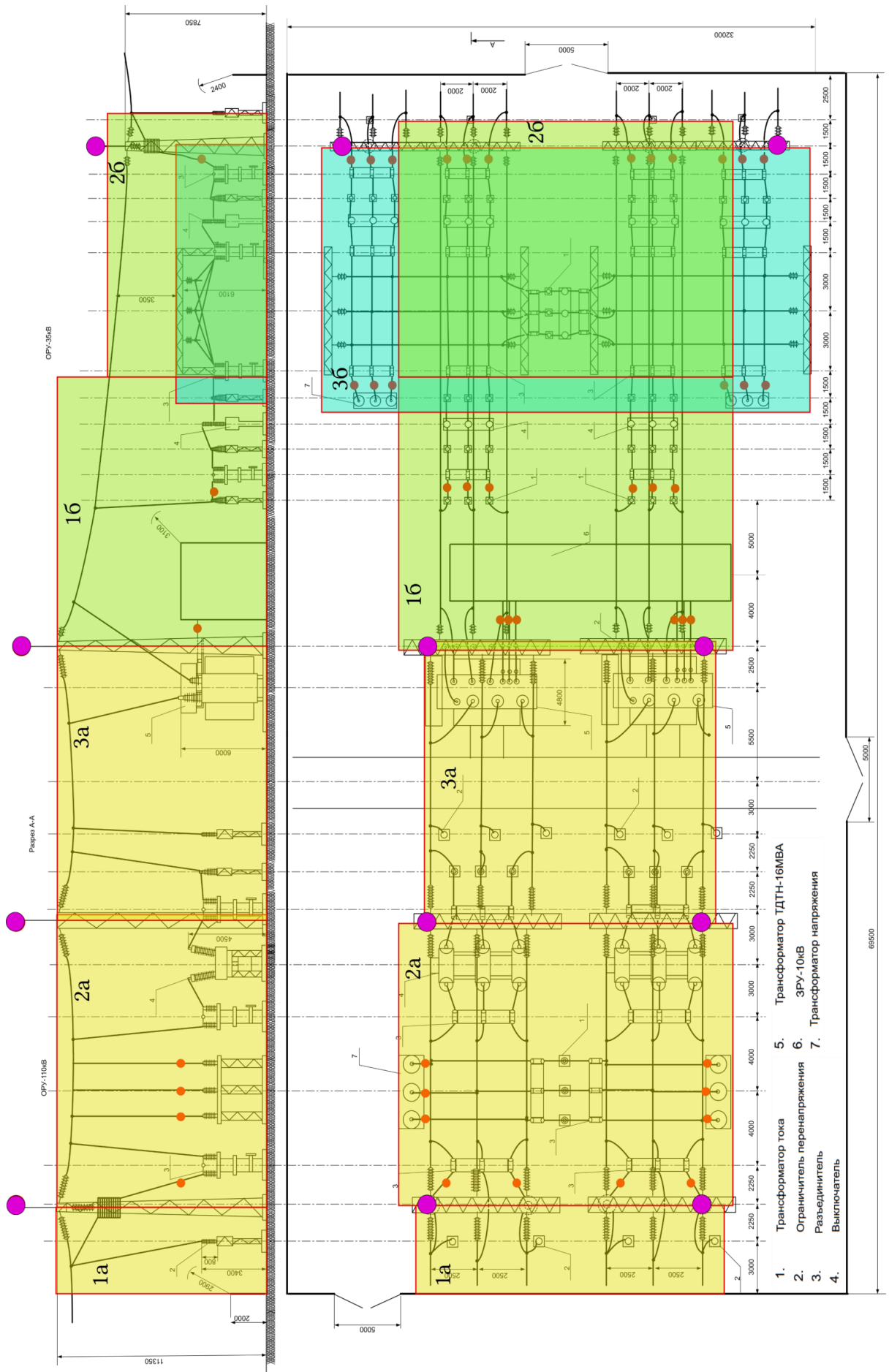


Рис. 7. Молниезащита сложных конфигураций ОРУ-110/35 кВ

Выводы

При проектировании молниезащиты объектов сложных конфигураций невозможно обойтись без применения многократных молниеотводов.

Ручной расчёт сложных объектов требует большого количества времени и учёта многих факторов при проектировании. По этой причине для решения таких задач с целью получения максимально быстрого, обоснованного, достоверного и сбалансированного результата целесообразно использовать компьютерные технологии и специализированное программное обеспечение.

Каждое из существующих на сегодняшний день программных решений заставляет пользователя идти на компромисс – ограниченный функционал либо профессиональное коммерческое решение.

Web-приложение «Расчет молниезащиты многократными стержневыми молниеотводами» выполнено с целью упростить и оптимизировать расчёт молниезащиты образованной многократными молниеотводами. Корректность его работы была проверена путём сравнения результатов, полученных при расчёте другими доступными инструментами.

В приложение реализован следующий отличительный функционал:

- построение зон защиты образованной многократными стержневыми молниеприёмниками;
- возможность разделить объект на зоны различной высоты;
- подбор минимизированной высоты молниеприёмника;
- проверка объекта на защищённость;
- отказ от использования 3-х мерной модели.

Список литературы

1. V российская конференция по молниезащите Новости электротехники Журнал 3(99) 2016 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2016/99/07.php>
2. Типы молниеприёмников: мачта, трос и сетка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://zandz.com/ru/biblioteka/tipy_molniepriemnikov/
3. Исследование молниезащиты открытых распределительных устройств электрических станций и подстанций Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 61-66.
4. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций СО 153-34.21.122-2003. – Москва : Издательский дом ЭНЕРГИЯ, 2013. – 64 с. – ISBN 978-5-98908-103-5. – Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/22686.html> (дата обращения: 08.02.2022).
5. Дьяков, А.Ф. [и др.]. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / под ред. А. Ф. Дьякова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издат. дом МЭИ, 2011. – 544 с.
6. Программа «ЗУМ». Приложение к AutoCAD, предназначенное для комплексного расчета систем молниезащиты и заземления при проектировании объектов электроэнергетики. [Электронный ресурс]: URL: <https://zym-emc.ru/zymprogram.html> (дата обращения: 08.02.2022).
7. Сервис расчётов надёжности системы молниезащиты и вероятности прорыва молнии в объект. [Электронный ресурс]: URL: <https://calculations.zandz.com/> (дата обращения: 08.02.2022).

I.A. Bershadskiy /Dr. Sci. (Eng.)/, A.V. Zgarbul /Cand. Sci. (Eng.)/, I.I. Mazurov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

CALCULATION OF PROTECTION ZONES OF ELECTRIC POWER OBJECTS BY MULTIPLE LIGHTNING RODS

Background. Energy facilities usually consist of large buildings or several structures occupying a significant area, in the design of lightning protection of which it is impossible to do without the use of multiple lightning rods, the use of combinations of which significantly increase the protection zone. Manual calculation of such objects requires a lot of time and takes into account many factors in the design. For this reason, in our time of computerization, in order to solve such problems, in order to obtain the fastest, most reasonable, reliable and balanced result, it is advisable to use computer technologies and specialized software.

Materials and/or methods. The use of specialized software obliges to take into account many factors that greatly complicate the design process, and besides, they are of a commercial nature.

Existing online services have limited, primitive functionality, which comes down to elementary calculation of parameters and construction of zones of single lightning rods.

Thus, each of the currently existing software solutions forces the user to compromise. Limited func-

tionality or professional commercial solution.

Results. The web-application “Calculation of lightning protection by multiple lightning rods” is designed to simplify and optimize the calculation of lightning protection formed by multiple lightning rods. The correctness of its work was verified by comparing the results obtained in the calculation of other available tools.

Conclusion. The developed Web application can find practical application among users. Due to its ease of use and the presence of distinctive functionality, it occupies a place between services that have limited functionality and professional commercial programs. Its use of the application will allow the user to get rid of the compromise and optimize the organization of lightning protection when designing zones of multiple lightning rods of special objects.

Keywords: lightning protection, rod lightning receiver, multiple lightning discharge, protection zone, software.

Сведения об авторах

И.А. Бершадский

SPIN-код: 4772-3504
ORCID iD: 0000-0001-7383-3415
Телефон: +380 (71) 414-28-12
Эл. почта: ibernsh164@gmail.com

И.И. Мазуров

Телефон: +380 (71) 469-70-03
Эл. почта: myspace@gmail.com

А.В. Згарбул

Телефон: +380 (71) 465-02-28
Эл. почта: zgarbul.andrey@gmail.com

Статья поступила 08.12.2021 г.

© И.А. Бершадский, А.В. Згарбул, И.И. Мазуров, 2021

Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев

