

- статический коэффициент передачи $k = 0,43$;
- постоянная времени $T = 365$ с.

Выводы

1. Определение передаточной функции объекта управления может производиться теоретико-экспериментальным методом, основанным на исследовании компьютерной модели объекта управления методом вычислительного эксперимента, позволяющим оценить наиболее важные характеристики теплицы как объекта управления уже на стадии проектирования.

2. Расчет выполнен на базе компьютерной модели объекта, построение которой основано на использовании современной CAE-системы ANSYS. Это позволило решать задачи численными методами, исключая значительные упрощения, присущие существующим ме-

тодикам, основанным на решении системы уравнений теплового баланса, в которую входят уравнения сохранения тепла и массы для всех объемов и поверхностей сооружений, участвующих в тепло- и массообмене.

Список литературы

1. Дилигенская А. Н. Идентификация объектов управления. Учебное пособие [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://home.samgtu.ru/~auts/books/diligenskaya_tutorial_2009.pdf.
2. Киселев Н. В., Каравайков В. М. Моделирование процессов тепломассопереноса на основе технологии ANSYS//Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. 2012. № 9-10.
3. Определение параметров переходных характеристик/[Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://automation-system.ru/main/item/70-opredelenie-parametrov-perexodnyx-karakteristik.html>.

*Каравайков Владимир Михайлович — д-р техн. наук, проф.,
Волков Илья Олегович — аспирант Костромского государственного технологического университета.
Контактный телефон (4942) 31-69-91.
E-mail: kvml@ya.ru*

ВСЕРЕЖИМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов,

М.В. Андреев (Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

Представлены разработанные средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем, обеспечивающие адекватное моделирование непрерывного спектра значимых квазиустановившихся и переходных процессов, в том числе связанных с перенапряжениями, в оборудовании и энергосистемах в целом. Приведены фрагменты проведенных исследований на примерах воспроизведения коммутационных перенапряжений в электрической сети реальной энергосистемы¹.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, всережимное моделирование, реальное время, квазиустановившиеся и переходные процессы, верификация, идентификация, достоверность, коммутационные перенапряжения.

Надежность и эффективность проектирования, исследования и эксплуатации оборудования, электрических сетей (ЭС) и электроэнергетических систем (ЭЭС) в целом в определяющей мере зависит от полноты и достоверности используемой при этом информации об условиях работы оборудования, ЭС и ЭЭС в возможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы. В частности, эти вопросы регламентируют методические указания и рекомендации по применению ограничителей перенапряжений в ЭЭС. Однако обоснованность выбора типов и мест их установки в соответствии с этими указаниями зависит от адекватности информации о возможных значениях и длительности перенапряжений, наиболее опасных среди которых являются коммутационные. Ввиду известной специфики

и сложности современных ЭЭС получение такого рода информации возможно только путем преимущественно математического моделирования оборудования и ЭЭС в целом. При этом обеспечение достаточной полноты и достоверности обозначенной информации связано с применением для всего без исключения значимого оборудования и соответственно ЭЭС трехфазных бездекомпозиционных математических моделей, непрерывно и адекватно описывающих реальный спектр процессов в оборудовании. В результате образующаяся модель любой реальной ЭЭС, с учетом допустимого частичного эквивалентирования, неизбежно содержит очень жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности. Согласно теории методов дискретизации для дифференциальных

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» 2.1318.2014 «Разработка и исследование гибридного моделирующего комплекса энергосистемы с активно-адаптивной сетью».

уравнений, подобные системы уравнений плохо обусловлены на ограничительных условиях применимости методов их численного интегрирования и не могут быть решены удовлетворительно. Единственный способ улучшения обусловленности заключается в снижении жесткости, дифференциального порядка, нелинейности и ограничений в соответствии с теоремой Далквиста интервала решения (воспроизведения процессов) [1, 2]. Отмеченная необходимость указанных упрощений и ограничений свойственна всем программным и программно-аппаратным средствам сугубо численного моделирования ЭЭС. Неустраняемая необходимость этих упрощений и ограничений препятствует адекватному моделированию единого непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов, в том числе коммутационных перенапряжений в оборудовании, высоковольтных сетях и реальных ЭЭС в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их функционирования.

Единственной альтернативой используемому в настоящее время численному моделированию ЭЭС может служить комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование.

Проблемы адекватного моделирования больших динамических систем, среди которых ЭЭС являются одними из наиболее многомерных, в последние годы обсуждается во многих промышленно развитых странах: в США, странах Европы, Китае и др. начиная с 1998 г. по настоящее время ежегодно проводится международный симпозиум «Гибридные системы: вычисление и управление» (HSCC).

Для решения указанных проблем авторами разработана концепция непрерывного, адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале единого спектра трехфазных квазиустановившихся и переходных процессов, включая перенапряжения в оборудовании, сетях и ЭЭС в целом, при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их функционирования. Для реализации этой концепции созданы программно-технические средства (ПТС), адаптированные для исследования, анализа всевозможных перенапряжений и использования полученной достаточно полной и достоверной информации для выбора типов и мест установки

ограничителей перенапряжений, в том числе согласно ранее названным указаниям и рекомендациям.

Обозначенный комплексный подход к решению проблемы образует общую теоритическую и научно-техническую основу, на базе которой созданы «Всерезимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС» (ВМК РВ ЭЭС) [3] и «Мультипроцессорная моделирующая система реального времени ЭЭС с активно-адаптивными сетями» (ММС РВ ЭЭС с ААС) [4]. Структурная схема ММС РВ ЭЭС с ААС приведена на рис. 1. ВМК РВ ЭЭС имеет аналогичную структуру.

Особенности предложенного комплексного подхода.

1. Для достижения необходимой полноты и достоверности моделирования все без исключения значимые элементы ЭЭС воспроизводятся синтезированными для этих целей математическими моделями, исключающими декомпозицию процессов в оборудовании и ЭЭС в целом.

2. Используется способ непрерывного неявного интегрирования жестких, нелинейных систем дифференциальных уравнений высокой размерности.

3. Формирование узлов моделируемых трехфазных схем ЭЭС осуществляется на физическом уровне путем преобразования непрерывных математических пере-

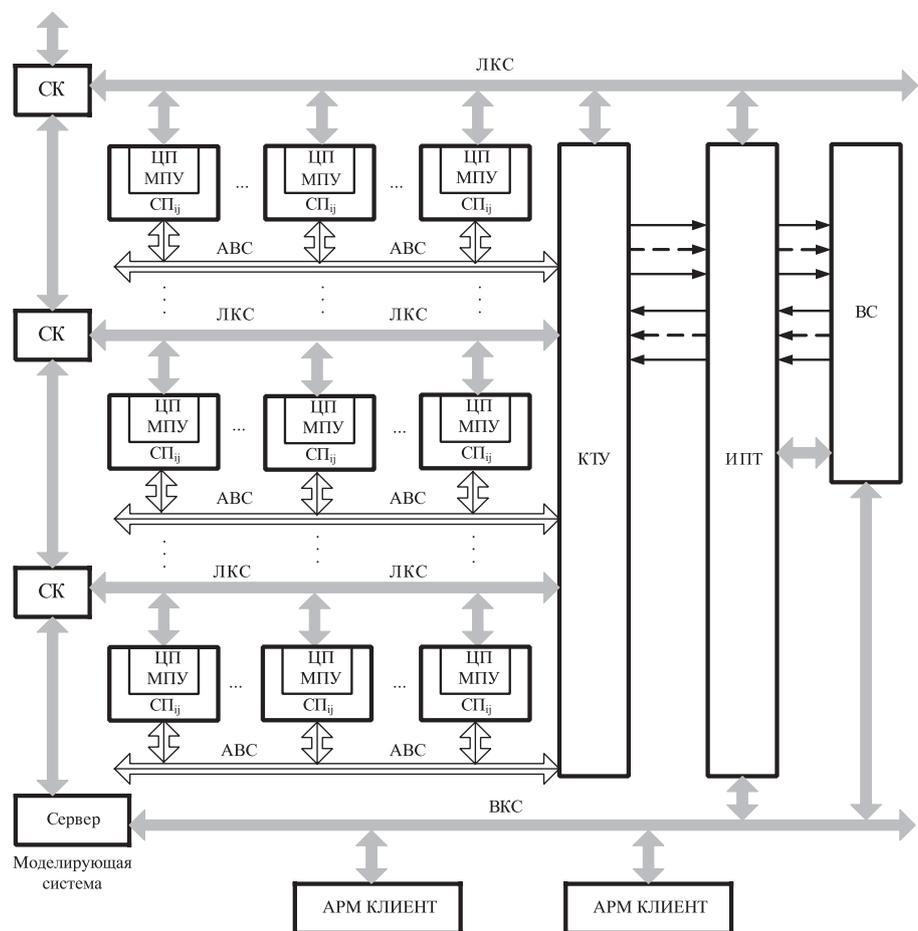


Рис. 1. Структурная схема ММС РВ ЭЭС с ААС

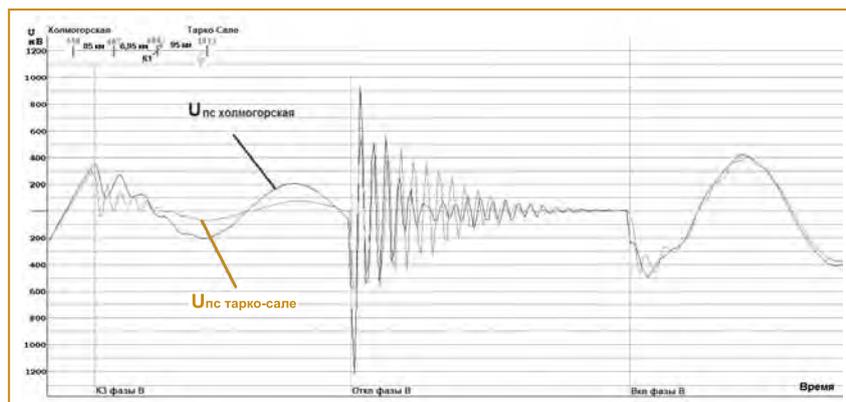


Рис. 2. Опыт короткого замыкания фазы В (в узле 608) на линии Холмогорская – Тарко-Сале Тюменской ЭЭС

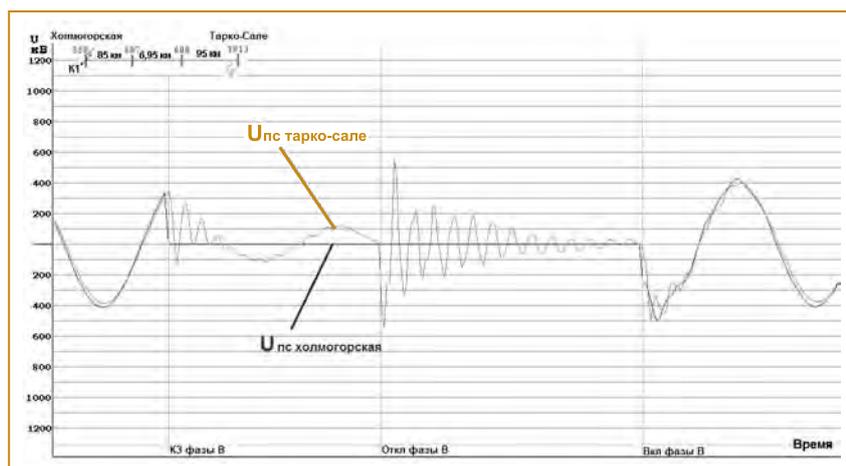


Рис. 3. Опыт короткого замыкания фазы В (в узле 550) на ПС Холмогорская Тюменской ЭЭС

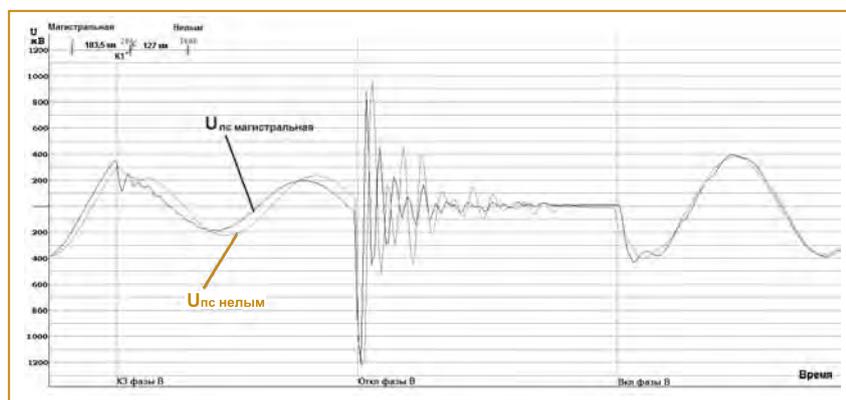


Рис. 4. Опыт короткого замыкания фазы В (в узле 206) на линии Магистральная – Нелым Тюменской ЭЭС

менных фазных токов моделируемых элементов ЭЭС в соответствующие им модельные физические токи и напряжения. Этим обеспечиваются: практически полное отсутствие ограничений на размерность моделируемых ЭЭС; адекватность воспроизведения спектра всевозможных трехфазных продольных и поперечных коммутаций, включая пофазные; подключение физических моделей различного оборудования и др.

4. Использование цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования информации позволяет

осуществлять все виды автоматизированного и автоматического управления параметрами и настройками моделирования, а также функциональным преобразованием и отображением информации моделирования функционирования релейной защиты и автоматики.

5. Реализация п.п. 1–3 с учетом п. 4 осуществляется посредством разработанных для этого специализированных процессоров (СП), унифицированных для всех видов элементов ЭЭС и универсальных для каждого из них. Каждый СП содержит соответствующие реализуемым физико-математическим моделям силового оборудования ЭЭС специализированные гибридные сопроцессоры и микропроцессорный узел (МПУ), состоящий из центрального процессора (ЦП) и функционально ориентированных периферийных процессоров. Трехфазные модельные физические входы/выходы всех СП оснащаются цифрууправляемыми продольно-поперечными коммутаторами, с помощью которых реализуются п. 2–4 в СП. Это дает возможность осуществлять всевозможные трехфазные и пофазные коммутации, в том числе в задаваемые моменты их выполнения.

6. Реализация п. 4 с учетом п.п. 1–3 и 5 осуществляется на базе новейших и перспективных достижений ИТ-технологий, обеспечивающих потенциально необходимый спектр информационно-управляющих возможностей для моделирования в реальном времени ЭЭС и эффективного решения обозначенных и других задач их проектирования, исследования и эксплуатации. Для этого функциональные трехфазные входы/выходы фаз А, В, С (АВС на рис. 1) всех СП соединяются между собой согласно топологии моделируемой ЭЭС с помощью коммутатора трехфазных узлов (КТУ), а ЦП их

микропроцессорных узлов объединяются посредством сетевых коммутаторов (СК) локальной компьютерной сети (ЛКС) с сервером, на котором устанавливается разработанное для указанных целей специализированное ПО.

7. Для использования названных гибридных моделирующих комплексов создается профессионально-ориентированное программное обеспечение АРМ Клиента, без ограничений устанавливаемое на сервере

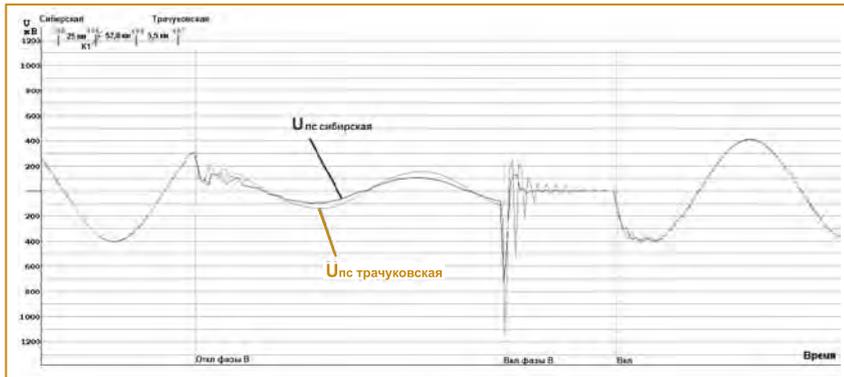


Рис. 5. Опыт короткого замыкания фазы В (в узле 466) на линии Сибирская – Трачуковская Тюменской ЭЭС

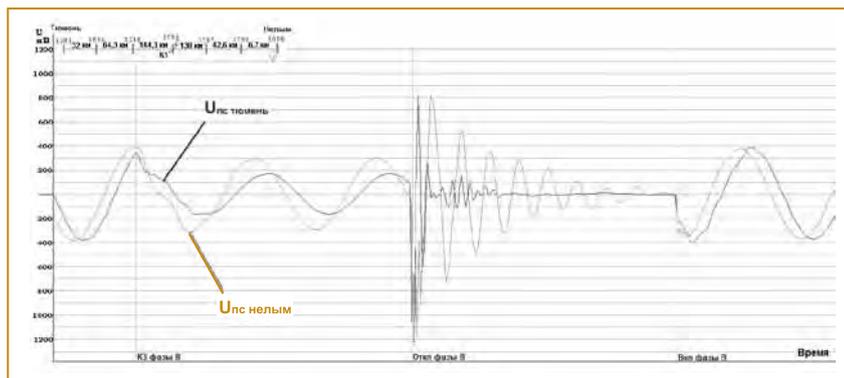


Рис. 6. Опыт короткого замыкания фазы В (в узле 1795) на линии Тюмень – Нелым Тюменской ЭЭС

ре и на компьютерах пользователей во внешних компьютерных сетях (ВКС), информационно взаимодействующих с сервером посредством сети Ethernet.

8. Для информационно-управляющего и физического взаимодействия с реальным оборудованием: станциями управления устройствами FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems (гибкие системы передачи переменного тока)), устройствами релейной защиты и автоматики, оперативным информационным комплексом, различными информационно-управляющими системами и другими внешними средствами (ВС) разработаны и используются соответствующие интерфейсные программные и программно-технические средства (ИПТ), имеющие для физического взаимодействия с внешними средствами согласующие усилители и информационные взаимосвязи с сервером и СП по локальной и внешним компьютерным сетям.

9. Необходимые для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС эксплуатационно-технические характеристики реализуемых согласно п. п. 1–7 программно-технических средств обеспечиваются применением новейших достижений интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и ИТ-технологий, использованием при их реализации современных систем автоматизированного проектирования и монтажа материнских печатных плат СП.

В отличие от используемых в настоящее время численных средств расчета режимов и процессов в реальных ЭЭС разработанные ПТС обеспечивают непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной, всегда приемлемой инструментальной точностью жестких нелинейных систем дифференциальных уравнений высокой размерности. Это позволяет достаточно полно и достоверно воспроизводить единый спектр трехфазных квазиустановившихся и переходных процессов, перенапряжений во всех видах и типах силового электрооборудования, сетях и реальных ЭЭС в целом, что в свою очередь позволяет надежно и обоснованно производить выбор типов и мест установки ограничителей перенапряжений.

Кроме того, указанные свойства и возможности разработанных средств моделирования ЭЭС обеспечивают также решение актуальной проблемы надежной верификации осуществляемого моделирования и соответственно идентификации моделируемых ЭЭС, включая конкретное силовое оборудование, релейную защиту, технологическую и противоаварийную автоматику, различные системы автоматического управления и информационно-управляющие системы.

С использованием разработанных гибридных комплексов весь единый спектр значимых квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом, в том числе перенапряжений, воспроизводится в данных средствах в результате непрерывного и методически точного решения одной и той же всережимной модели ЭЭС. Таким образом, любой квазиустановившийся режим является текущим результатом аналогичного решения на частоте, близкой к 50 Гц, и надежно верифицируется по натурным данным сервера оперативно-информационного комплекса (ОИК) моделируемой ЭЭС, особенно контрольным диспетчерским замерам. Следовательно, в полосе частот, определяемой амплитудно-частотными и фазо-частотными характеристиками и используемой в представленных средствах интегральной микроэлектронной элементной базы, также достоверно будут воспроизводиться все указанные процессы этого спектра. Рассмотренная верификация и идентификация всесторонне и многократно проведена при выполнении конкретных практических исследований на разработанных программно-технических комплексах для Тюменской, Томской энергосистем и объединенной энергосистемы Вос-

тока. В качестве примеров на рис. 2–6 представлены осциллограммы, демонстрирующие фрагменты обозначенных исследований, в рамках которых изучались коммутационные перенапряжения в сети напряжением 500 кВ Тюменской ЭЭС.

На представленных осциллограммах отображены изменения во времени напряжений на шинах подстанций Тюменской ЭЭС. В левом верхнем углу представлен исследуемый фрагмент схемы энергосистемы (при этом моделировалась вся Тюменская ЭЭС) с указанием номеров промежуточных узлов и длин отрезков между ними, а также указанием места короткого замыкания. В результате выполнения исследований коммутационных перенапряжений была составлена карта для сети с напряжением 500 кВ Тюменской энергосистемы, существенно облегчающая, в частности, задачу проектирования и настройки устройств защиты и автоматики. Часть исследований верифицирована по данным, имеющимся у службы эксплуатации.

Подтвержденные результатами экспериментальных исследований свойства и возможности разработанных средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС позволяют надежно верифицировать и адекватно воспроизводить весь значимый спектр квазиустановившихся и переходных процессов

в оборудовании и ЭЭС в целом. Это относится и к перенапряжениям, в частности, коммутационным, образующим наиболее опасную совокупность условий работы оборудования по значениям и длительности.

Использование указанной достаточно полной и достоверной информации о процессах в оборудовании и ЭЭС при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы обеспечивает надежное и эффективное решение большинства важнейших задач проектирования, исследования и эксплуатации.

Список литературы

1. Холл, Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст] / Дж. Холл, Дж. Уатт: пер. с англ.; под ред. А.Д. Горбунова. М.: Мир, 1979. 312 с.
2. Хайпер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и алгебро-дифференциальные задачи. Пер. с англ. М.: Мир, 1999. 612 с.
3. Гусев, А. С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем. // Известия Вузов. Проблемы энергетики. 2008. № 9.10/1. С. 164-170.
4. Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени энергосистем. // Электричество. 2012. № 6. С. 10-13.

Боровиков Юрий Сергеевич — канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Электроэнергетические системы», Гусев Александр Сергеевич — д-р техн. наук, проф., Сулайманов Алмаз Омурзакович — канд. техн. наук, зав. научно-исследовательской лабораторией «Моделирование электроэнергетических систем», Андреев Михаил Владимирович — канд. техн. наук, ассистент Энергетического института Томского политехнического университета.
 Контактные телефоны: (3822) 701-777 / 3406.
 E-mail: gusev_as@tpu.ru, andreevmv@tpu.ru

Mitsubishi Electric оборудовала стадион «Открытие Арена» светодиодными экранами последнего поколения

На днях завершился монтаж светодиодных экранов (LED-дисплеев) серии Diamond Vision от Mitsubishi Electric на новом стадионе «Открытие Арена», домашней площадке московского футбольного клуба «Спартак». Теперь все любители футбола, пришедшие на матч, смогут наблюдать за игрой на высококачественном светодиодном экране и увидеть все в мельчайших подробностях, вне зависимости от того, на какие трибуны они купили билеты.

На данный момент экраны Diamond Vision на стадионе «Спартак» являются самыми большими из когда-либо установленных на спортивных объектах России. Размер каждого экрана составляет 17,9x9,6 м, соответственно, его площадь — 172 м². Технологическая основа экранов — новые светодиодные модули Diamond Vision ODX8. Соотношение сторон — 16:9, разрешение — 1600x960 пикселей, яркость — 6000 кд/м². Все это обеспечивает высококачественное изображение даже при ярком дневном освещении.

Diamond Vision ODX8 от Mitsubishi — самый современный экран, представленный в серии Diamond Vision и являющийся ответом компании на потребности растущего мирового рынка светодиодных экранов. Новая дельтовидная светодиодная 8-миллиметровая ячейка, а также ком-

плексный подход позволили компании Mitsubishi создать продукт непревзойденного качества с высокой степенью надежности по привлекательной цене.

Дисплеи были установлены Mitsubishi Electric в сотрудничестве с московскими партнерами «Армо-системы» и «Авилекс» на противоположных сторонах стадиона — на Южной и Северной трибунах — в соответствии с требованиями и рекомендациями FIFA. Таким образом, теперь система видеотрансляции на стадионе «Открытие Арена» отвечает высочайшим мировым стандартам видеосистем на спортивных объектах.

Стадион вместимостью 42 тыс. человек оснащен новейшим оборудованием и построен с учетом современных требований безопасности и комфорта болельщиков и игроков, что дает ему возможность пройти сертификацию РФС и УЕФА по наивысшей категории и принимать у себя не только матчи этапов чемпионата России, но и игры Премьер-лиги. «Открытие Арена» примет первых болельщиков 5 сентября 2014 г., в 2017 г. здесь пройдут матчи Кубка конфедераций, а в 2018 г. он станет одной из площадок, которая будет принимать Чемпионат мира по футболу.

<http://MitsubishiElectric.ru>