

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Г.П. Корнилов, korn_mgn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

А.Н. Шеметов, a.shemetov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7184-2190>

В.В. Шохин, shww@mgn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8804-2253>

Д.Ю. Усатый, usatiydu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1176-9531>

М.М. Лыгин, eligin@ya.r, <https://orcid.org/0000-0001-8884-4846>

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия*

Аннотация. В статье рассматривается комплекс научных подходов и технических мероприятий, направленных на повышение эффективности электроснабжения предприятий черной металлургии, прорабатываемых научными школами МГТУ им. Г.И. Носова совместно с ПАО «ММК». Описаны принципы формирования математических моделей энергопотребления, основы их оптимизации, а также практические вопросы нормирования и планирования энергозатрат и оперативного управления энергохозяйством. Приведены примеры реализации энергосберегающих мероприятий на собственных заводских электростанциях, а также на таких энергоёмких объектах, как дуговые сталеплавильные печи и прокатные станы. Представлен опыт ПАО «ММК» по внедрению современных средств автоматизации в энергохозяйстве и системах электроснабжения в рамках перспективной программы развития «Индустрия 4.0».

Ключевые слова: металлургический комбинат, электроснабжение, энергосбережение, собственная генерация, альтернативный привод технологических агрегатов, дуговые сталеплавильные печи, качество электрической энергии

Для цитирования: Опыт внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий в системах электроснабжения металлургического предприятия / Г.П. Корнилов, А.Н. Шеметов, В.В. Шохин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 1. С. 12–20. DOI: 10.14529/power220102

Original article
DOI: 10.14529/power220102

EXPERIENCE IN IMPLEMENTING ENERGY AND RESOURCE SAVING TECHNOLOGIES IN A ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEMS OF METALLURGICAL PRODUCTION

Gennadiy P. Kornilov, korn_mgn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Andrey N. Shemetov, a.shemetov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7184-2190>

Valeriy V. Shokhin, shww@mgn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8804-2253>

Dmitriy Yu. Usatyy, usatiydu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1176-9531>

Maksim M. Lygin, eligin@ya.r, <https://orcid.org/0000-0001-8884-4846>

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The article considers a set of scientific approaches and technical measures aimed at improving the efficiency of power supply to ferrous metallurgy enterprises, currently being designed by the scientific schools of the Nosov Magnitogorsk State Technical University together with PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”. The principles of the formation of mathematical models for energy consumption, the basics of their optimization, as well as practical issues of rationing and planning energy consumption and operational management of the energy economy are described herein. The study offers examples of the implementation of energy-saving measures at own factory power plants, as well as at such energy-intensive facilities as arc steelmaking furnaces and rolling mills. The experience of PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” with regard to the introduction of modern automation tools in the energy sector and power supply systems within the framework of the promising development program “Industry 4.0” is presented.

Keywords: metallurgical plant, power supply, energy saving, own generation, alternative drive of technological units, electric arc furnaces, quality of electrical energy

For citation: Kornilov G.P., Shemetov A.N., Shokhin V.V., Usatyy D.Yu., Lygin M.M. Experience in implementing energy and resource saving technologies in a electric power supply systems of metallurgical production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(1):12–20. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220102

Введение

Черная металлургия – это базовая энергоемкая отрасль промышленности, на которую приходится потребление около 90 % коксующихся углей, 10–15 % природного газа и до 15 % электроэнергии. При этом она является одной из немногих сфер промышленного производства постсоветского периода, сохранившей на высоком уровне востребованность на отечественном и зарубежном рынках. Однако в современных экономических реалиях главным условием повышения конкурентоспособности любого предприятия является снижение себестоимости, в том числе – за счет энергетической составляющей, что может быть достигнуто за счет внедрения новых энергосберегающих технологий в основном производстве и в системах генерации и передачи электроэнергии. Обозначенные цели достигаются в результате исследований технологических процессов энергоемких производств, а также анализа работы мощных уникальных агрегатов – электродуговых печей и прокатных станов. Себестоимость же электроэнергии снижается благодаря эффективному использованию собственных электростанций, работающих в том числе на вторичных топливных газах, а также за счет сокращения потерь на передачу и распределение энергии во внутривозовских сетях.

Объект исследования

Решение задач модернизации производства и снижения энергозатрат на любом промышленном предприятии невозможно без разработки стратегии энергосбережения, формирования долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных программ с обязательной отчетностью и коррекцией целевых показателей. Это позволяет избежать стратегических ошибок и неоправданных затрат. Принципиально важным моментом в реализации программы энергосбережения является комплексный подход, охватывающий все технологические переделы производства и виды энергоресурсов [1–4].

Анализ, проведенный отечественными и зарубежными консалтинговыми агентствами на ряде предприятий России, показывает, что потенциал энергосбережения составляет в среднем от 20 до 60 % существующего уровня энергозатрат. Серьезный экономический эффект может быть получен как путем модернизации и реструктуризации технологических процессов, так и за счет реконструкции и замены энергетического оборудования. Кроме того, реализация энергосберегающих мероприятий позволит решить целый комплекс проблем в области промышленной экологии и охраны окружающей среды, что повысит привлекательность предприятия для государственных и частных инвесторов. В любом случае концепция энергосбережения разрабатывается с обязательной привязкой к стратегическим программам устойчивого развития предприятия и подтверждается соответ-

ствующими экономическими расчетами с учетом инфляционных процессов, прогнозов внешнего и внутреннего рынка и тарифной политики естественных монополий [1, 3].

Тактические задачи преследуют решение актуальных вопросов сокращения отдельных энергоресурсов, утилизации избытков вторичных газов, тепла, сокращения потерь. Они определяются и формируются исходя из краткосрочных задач на год, в них концентрируются те проблемы, которые сдерживают рост производства, влияют на формирование затрат при планировании годового бюджета. Тактические задачи, как правило, реализуются в течение года, в таких же временных границах лежат и сроки возврата вложенных средств. При их высокой экономической эффективности это может привести к созданию собственного инвестиционного поля для продвижения следующих краткосрочных проектов, так называемых револьверных программ. Приоритеты предприятие определяет самостоятельно в зависимости от конкретных условий.

Рассмотрим состояние и возможные перспективы реализации энергоэффективных проектов на примере одного из крупнейших предприятий черной металлургии России – ПАО «ММК».

1. Собственная генерация и повышение надежности электроснабжения

Особенностью металлургического комбината с полным циклом производства «чугун – сталь – прокат» является выработка электроэнергии на заводских электростанциях. Основным стимулирующим фактором является наличие вторичных топливных газов – коксового и доменного, а также высокие тарифы на электроэнергию, потребляемую из внешней энергосистемы [5].

Выработка электроэнергии на собственных электростанциях ПАО «ММК» достигает в настоящее время более 60 % общего потребления предприятия, а ее стоимость оказывается в 2–2,5 раза ниже покупной. Но при этом энергоемкость электроэнергии или энергозатраты на ее производство заметно превышают энергозатраты крупной тепловой электростанции категории ГРЭС, что в конечном счете повышает удельную энергоемкость продукции комбината [1, 3]. При такой мотивации использование установленной мощности генераторов и их фактическая загрузка по активной мощности намного превышает номинальное значение, что отрицательно сказывается на устойчивости электростанции при нарушениях внешнего электроснабжения. Одним из эффективных и доступных способов повышения устойчивости является адаптация систем автоматического регулирования возбуждения (АРВ) генераторов к конкретным условиям эксплуатации [6–8]. Известные законы регулирования на поддержание напряжения или реактивной мощности и реализованные в сис-

темах АРВ с постоянной структурой не всегда применимы для синхронных генераторов заводских электростанций относительно небольшой мощности. Для таких генераторов главной задачей является не столько поддержание напряжения и реактивной мощности в точках присоединения, сколько сохранение устойчивости при изменении основных системных параметров в известном диапазоне. На кафедре электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им Г.И. Носова разработана система АРВ, обеспечивающая необходимый уровень статической устойчивости генераторов с учетом уровня напряжения и реальной нагрузки [6]. Доказано, что при относительно высокой мощности короткого замыкания энергосистемы в точке присоединения статическая устойчивость генераторов обеспечивается при условии их загрузки не выше номинального значения. Указанные принципы реализованы в системе АРВ с переключающейся структурой, где возбуждение каждого генератора выбирается индивидуально в зависимости от напряжения внешней энергосистемы и собственной нагрузки.

Заслуживает внимания оптимизация режимов заводских электростанций в системе внутриводского электроснабжения. Известно, что основные показатели работы станции, определяющие экономичность, надежность и экологическую безопасность, зависят от большого количества электро- и теплотехнических факторов. Так, например, при использовании вторичных топливных газов (доменного и коксового), а также смеси угольной пыли и природного газа одно и то же топливо при сжигании на различных объектах дает неодинаковый эффект [5]. Для повышения эффективности заводских электростанций разработаны пути оптимизации их режимов, основанные на методах последовательного эквивалентирования и динамического программирования, позволяющие эффективно распределять активные мощности между отдельными станциями и генераторами каждой из них в нормальных, ремонтных и послеаварийных режимах работы.

Заводские электростанции дают дополнительные возможности непосредственного использования тепловой энергии без преобразования ее в электрическую в приводах различных механизмов. «Острый» пар используется в паровых турбинах, компрессорах для подачи воздуха в блоки разделения кислородных станций. В ПАО «ММК» до настоящего времени действует паровой привод прокатного стана 4500, изготовленного в Германии в начале прошлого века и эвакуированного в 1941 г. из Мариуполя. Примечательно, что «экскаваторная» механическая характеристика в данном случае формируется естественным образом и благодаря этому не было отмечено аварийных разрушений прокатных валков и шпинделей за всю историю эксплуатации [9].

Особое место в отечественной металлургии занимают паровые турбины воздуходувки доменных печей, где расход дутья составляет 2–2,5 м³/мин на единицу полезного объема. Это значит, что для нормальной работы домны объемом 2500–3000 м³ необходима воздуходувка производительностью 5000–7000 м³/мин и мощностью 20–30 МВт с регулированием скорости. С учетом таких требований в приводе воздуходувок традиционно использовались конденсационные паровые турбины [1]. В настоящее время паровой привод воздуходувок в чистом виде сохранился лишь на старейшем предприятии отрасли – ПАО «ММК». В доменных цехах НЛМК и Северстали, построенных позднее, используется регулируемый электропривод с мощными синхронными двигателями. Однако практика показала, что замена электропривода воздуходувок на паровой способствует повышению КПД заводских электростанций и кроме снижения суммарного электропотребления часто обеспечивает лучшие технологические показатели работы агрегатов.

2. Особенности электроснабжения мощных нелинейных потребителей – электродуговых печей и современных прокатных станов

За последние 20 лет потребляемая мощность ПАО «ММК» выросла почти в 1,5 раза – с 620 до 900 МВт (рис. 1). Этот прирост вызван пуском новых технологических объектов:

- пятиклетевой стан холодной прокатки 2000 (5×8 МВт);
- широкополосный стан горячей прокатки 5000 (2×12 МВт);
- три агрегата горячего цинкования (более 250 двигателей от 5 до 500 кВт);
- три агрегата доводки стали «ковш-печь» с мощностью трансформаторов от 28 до 45 МВА;
- две сверхмощные дуговые сталеплавильные печи (ДСП-180) с печными трансформаторами по 150 МВА [3, 4].

Уникальные мощности современных металлургических агрегатов привели к необходимости использования схемы «глубокого ввода» напряжением 110 кВ (для питания прокатных станов) и 220 кВ (для ДСП). При высокой мощности короткого замыкания в точке присоединения основные показатели качества электроэнергии при такой схеме электроснабжения (величина и форма напряжения) в основном соответствуют нормам действующего ГОСТ 32144–2013 [10]. Однако следует отметить некоторые специфические особенности упомянутых агрегатов, которые влияют на устойчивость их работы и технико-экономические показатели.

Мощные регулируемые электроприводы современных прокатных станов работают на переменном токе по схеме «преобразователь частоты – синхронный двигатель» (ПЧ – СД). При этом

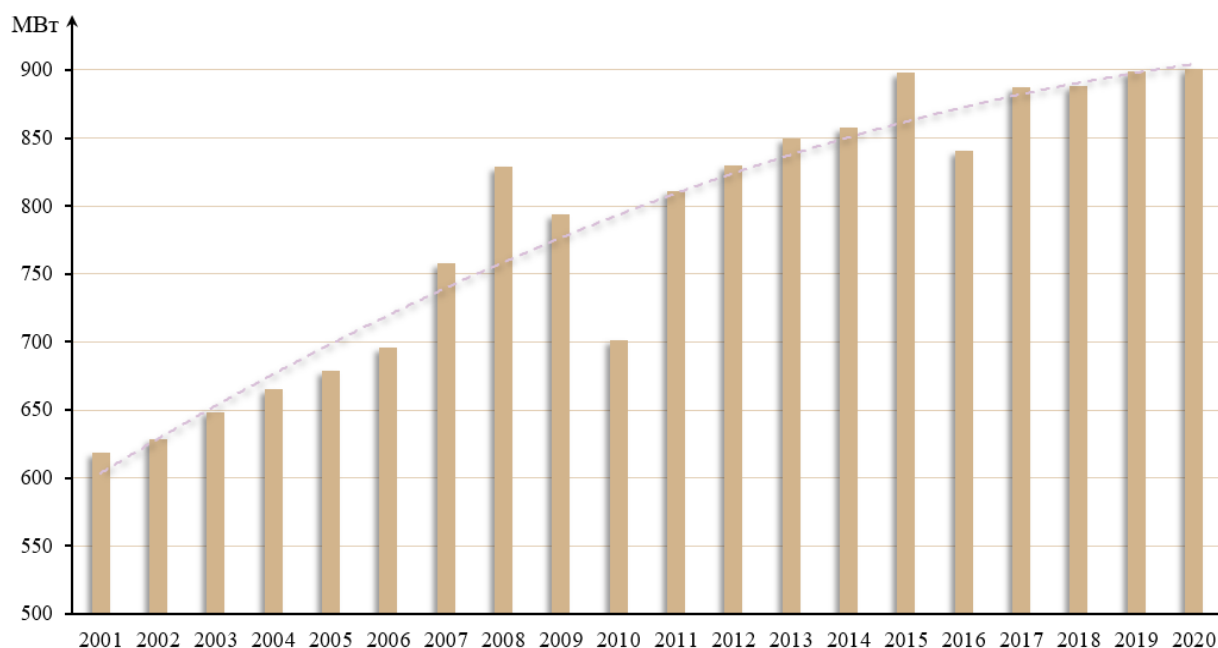


Рис. 1. Рост потребляемой электрической мощности ПАО «ММК» за 20 лет
Fig. 1. Growth of electric power consumption of PJSC MMK over 20 years

активный выпрямитель и выходной инвертор выполнены на полностью управляемых ключах: IGBT-транзисторах или IGCT-тиристорах. Принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ), заложенный в основу работы таких ключей, формирует нелинейную вольтамперную характеристику преобразователя как электроприемника [8]. С одной стороны, в активном выпрямителе практически отсутствует угол сдвига между напряжением и основной гармоникой тока, а это значит, что нет потребления реактивной мощности и их воздействие на сеть значительно слабее, чем у тиристорных преобразователей постоянного тока, которые установлены на действующих прокатных станах, построенных в конце прошлого века. С другой стороны, особенностью мощных активных выпрямителей является генерация высших гармонических составляющих тока, частотный диапазон которых значительно превышает 40-ю гармонику – крайнюю в действующем стандарте на качество электроэнергии. Кроме того, электроприводы с активными выпрямителями наиболее чувствительны к качеству питающего напряжения, в первую очередь – к несимметрии. Несимметричные провалы напряжения вызывают срабатывание токовой защиты и отключение привода, что приводит к нарушению технологического режима и простоям оборудования. Задача повышения устойчивости электроприводов с активными выпрямителями является в настоящее время наиболее актуальной и практически значимой. Результаты проведенных исследований описаны в работах [11–14].

Особенностью современных сверхмощных электродуговых печей является значительное по-

требление реактивной мощности и как следствие снижение напряжения на электродах [15, 16]. Электрическая мощность, выделяемая в печи при современных системах косвенного регулирования тока дуги, пропорциональна квадрату напряжения. Это значит, что при снижении напряжения на 10 % и более, мощность дуги снижается не менее чем на 19 %. Поэтому практически все современные сверхмощные ДСП работают совместно с устройствами компенсации реактивной мощности, которые позволяют стабилизировать напряжение и сохранить производительность ДСП. Наиболее распространенная конструкция – статический тиристорный компенсатор (СТК), включает в себя фильтры 2, 3 и 4-й гармоник и тиристорно-реакторную группу (ТРГ):

$$Q_{\text{ДСП}} - Q_{\text{Ф}(2,3,4)} + Q_{\text{ТРГ}} \approx 0.$$

Практика показала, что при комплектных поставках оборудования ДСП иностранные фирмы-производители часто завышают мощности фильтров и ТРГ. Результаты исследований, проведенные в ПАО «ММК», показали, что мощность СТК 180 МВАр явно избыточна для печного трансформатора 150 МВА, поэтому фильтр 4-й гармоники 68 МВАр был отключен.

Отметим также, что две шахтные печи ПАО «Северсталь» с трансформаторами мощностью по 85 МВА и агрегаты «ковш–печь» с трансформаторами 40 МВА работают без СТК. Результаты НИОКР, выполненных на предприятии, показали необходимость установки СТК, что приведет к сокращению времени цикла плавки и повышению производительности до 8 %. [15, 16] Срок окупаемости при этом составит менее двух лет.

3. Автоматизация и цифровизация систем электроснабжения

Одним из перспективных направлений развития электроэнергетики является применение новых цифровых устройств: модулей релейной защиты, противоаварийной автоматики и телемеханики, систем учета и контроля качества электроэнергии, которые интегрируются в единую автоматизированную систему управления электроснабжением (АСУЭ). Их внедрение в условиях крупных электросетевых организаций и внутризаводских систем электроснабжения обусловлено требованиями повышения информированности персонала и режимной управляемости энергообъектов. На передовых предприятиях энергетики реализуются комплексные проектные решения в виде так называемых цифровых подстанций, основанных на стандартах серии МЭК 61850 и технологиях автоматизированного управления «интеллектуальными» электрическими сетями [17, 18].

В условиях промышленного электроснабжения потенциальные инвесторы смогут получать прибыль от внедрения таких технологий за счет сокращения числа аварий на подстанциях, оптимизации эксплуатационных затрат на оборудование и его обслуживание, а также экономии электроэнергии при оптимизации процессов электроснабжения.

Цифровой подстанцией (ЦПС) принято называть электроустановку, где все связи между изме-

рительными и управляющими устройствами (датчиками, приборами, преобразователями и исполнительными механизмами) осуществляются только по цифровым информационным каналам *Ethernet*, образующим единую информационную сеть передачи данных (рис. 2) [19]. Модули и контроллеры цифровой подстанции полностью заменяют «классические» цепи вторичной коммутации и сочетают в себе функции телемеханики, учета и контроля, защиты и противоаварийной автоматики. А соответствующее программное обеспечение не только обеспечивает человеко-машинный интерфейс, но и может работать в режиме «помощника диспетчера», реализуя таким образом концепцию «умных» электрических сетей *SmartGrid*.

Главной особенностью таких подстанций является принципиально новый «полевой» уровень, который включает в себя инновационные устройства первичного сбора информации: цифровые измерительные трансформаторы, микропроцессорные системы диагностики, модули сигнализации, передающие кодированные дискретные и аналоговые сигналы непосредственно в информационную сеть без многократного дополнительного преобразования.

Второе важное отличие – это объединение среднего уровня управления (устройства сбора данных и преобразователи интерфейсов) с верхним (серверы и АРМ пользователей), который об-

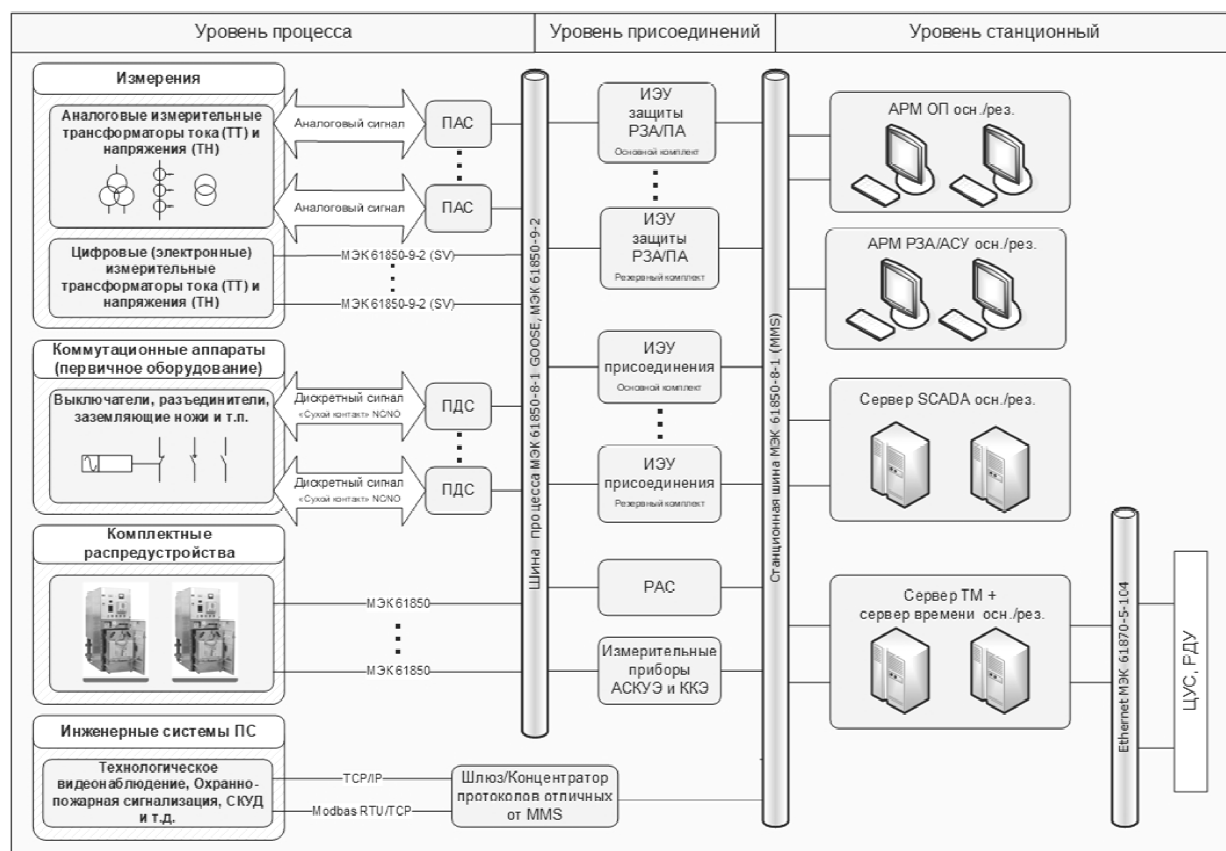


Рис. 2. Структурная схема цифровой подстанции [19]
Fig. 2. Block diagram of a digital substation [19]



Рис. 3. Общий вид учебного полигона цифровой подстанции
Fig. 3. General view of the digital substation training ground

ладает высокой степенью гибкости и может быть выполнен по модульному принципу, в зависимости от функционала и размеров подстанции (числа присоединений). Контроллеры отдельных присоединений и всей подстанции строятся на одной элементной базе и, при необходимости, могут резервировать друг друга, что невозможно в классических аналоговых и аналого-цифровых схемах управления

В ПАО «ММК» в настоящее время активно идет процесс внедрения концепции «Индустрия 4.0», что отражается на структуре новых объектов электроснабжения, возводимых на предприятии. Одним из характерных примеров является подстанция № 54, на которой присутствуют элементы цифровой подстанции. Однако уровень процесса остался традиционным, с установкой классических трансформаторов тока и напряжения, тогда как на уровне присоединения и уровне подстанции произошел переход от каналов передачи данных стандарта RS-485 с протоколами ModBus, SPABus и т. п. к среде Ethernet и универсальному протоколу МЭК-61850 [20].

На присоединениях подстанции установлены терминалы SEPAM, интегрирующие в себе всю информацию по присоединению и реализующие функции релейной защиты и телемеханики. Контроллер подстанции получает текущие данные с терминалов по протоколу МЭК-61850, обрабатывает их в соответствии с логикой технологического процесса, выполняет функцию хранения архивных данных по всем объектам, событиям и измерениям подстанции. Также контроллер предоставляет графический интерфейс для станций HMI, находящихся на посту дежурного по подстанции, и диспетчерского пункта Управления главного энергетика ММК в формате «тонкого клиента», что значительно упростило поддержку и эксплуатацию системы по сравнению с ранее используемыми решениями. Кроме того, реализованы дополнительные функции передачи файлов аварийных событий (осциллограмм), журналов текущих событий по всем присоединениям подстанции и

обмен данными между SEPAM отдельных присоединений, что было невозможно при использовании каналов связи стандарта RS-485.

В лаборатории кафедры электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Г.И. Носова совместно с ООО «ПиЭлСи Технолоджи» (г. Москва) смонтирован учебный стенд-полигон системы диспетчерского управления, моделирующий цифровую понизительную подстанцию 110/10 кВ (рис. 3). Установка представляет собой комплект реальных цифровых устройств систем телемеханики и имитационных моделей силового оборудования: высоковольтных выключателей и разъединителей. Функционал стенда позволяет получать, передавать и обрабатывать дискретные и аналоговые сигналы, выполнять команды телеуправления, визуализировать данные на touch-панели оператора либо через мнемосхему SCADA-системы.

Таким образом, можно отрабатывать не только обычные действия персонала (оперативные переключения) в электроустановках, но также исследовать схемы, компоновки и интерфейсы взаимодействия модулей и контроллеров различных присоединений подстанции. Поэтому установка широко используется как в учебном процессе – для студентов и слушателей курсов повышения квалификации, так и в научно-исследовательской работе.

Для полного перехода к формату цифровой подстанции в условиях действующего производства остается изменить уровень процесса в соответствии со стандартом «Индустрии 4.0». Опыт наладки, освоения и дальнейшей эксплуатации подстанции № 54 ПАО «ММК» показал преимущества использования «цифровизированных» элементов по сравнению с типовыми решениями стандартов предыдущего поколения.

Применение новых технологий и специализированного ПО при построении новых подстанций «с нуля» позволит сократить затраты на проектирование в среднем на 10–15 %, пусконаладочные работы – на 3–5 %, монтаж – на 30–50 %, и стои-

мость эксплуатации – на 15–20 %. Таким образом, курс на цифровизацию подстанций можно считать экономически оправданным и, безусловно, перспективным.

Заключение

Проведенные специалистами ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» исследования и разработки, результаты которых внедрены в реальное производство, позволяют сформулировать следующие выводы, общие для всех предприятий черной металлургии России.

1. С учетом изменившейся конъюнктуры на рынке сырья и энергоносителей для повышения конкурентоспособности отечественной металлургии следует добиваться более полного использования резервов металлургического производства, в частности – за счет применения вторичных энер-

гоносителей – конверторных газов и избыточного тепла технологических установок.

2. Возможным решением также является расширение парка собственных заводских электростанций, обладающих более высокими характеристиками за счет применения газотурбинных, газопоршневых и парогазовых установок.

3. Наряду с этим необходимо оптимизировать технологические и энергетические режимы мощных технологических потребителей (электросталеплавильных печей и прокатных станков), которые в значительной мере формируют графики электрических нагрузок и показатели качества электрической энергии предприятия в целом.

4. Реализация всех этих мероприятий невозможна без комплексной информатизации и цифровизации всех технологических процессов в системе энергоснабжения предприятия.

Список литературы

1. Управление энергопотреблением и энергосбережением. Теория и практика: моногр. / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец, А.Н. Шеметов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 422 с.
2. Современные проблемы и перспективы формирования модели управления энергохозяйством на предприятиях горно-металлургического комплекса / А.Н. Шеметов, С.В. Федорова, С.В. Кузнецов, Р.Н. Ляпин // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4 (33). С. 41–48. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-41-48
3. Копцев Л.А. Энергетическая результативность. Методы улучшения: опыт работы. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2019. 236 с.
4. Особенности электроснабжения металлургического комбината и возможные перспективы его развития / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, О.В. Газизова, Л.А. Копцев // Металлург. 2021. № 7. С. 81–89. DOI: 10.52351/00260827_2021_07_81
5. Варганова А.В., Джагаров Н.Ф. Комплексная оптимизация режимов работы промышленных тепловых электростанций // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4 (49). С. 11–16. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-4(49)-11-16.
6. Учет статической устойчивости синхронных генераторов в задаче планирования оптимальных режимов собственных электростанций по реактивной мощности / О.В. Газизова, А.В. Варганова, А.В. Малафеев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19, № 3. С. 23–33. DOI: 10.14529/power190303
7. Канафеев Р.И., Жирнов А.Д., Климова Т.Г. Оптимальная настройка автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 11–12. С. 77–83.
8. Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учеб. пособие для вузов / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, А.А. Мурзинов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 237 с.
9. Лейзерович А.Ш. Последний немецкий «угольщик»? // Электрические станции. 2021. № 1. С. 2–8. DOI: 10.34831/EP.2021.1074.1.001
10. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
11. Современные способы компенсации реактивной мощности крупных металлургических приводов / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, А.Н. Шеметов и др. // Известия вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 28–31.
12. Крубцов Д.С. Повышение устойчивости активных выпрямителей электроприводов прокатных станков к несимметрии питающего напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 19–24. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-2(35)-19-24
13. Корнилов Г.П., Абдулвелеев И.Р., Коваленко А.Ю. Повышение надежности электроснабжения металлургических агрегатов за счет схемотехнических решений // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19, № 4. С. 59–69. DOI: 10.14529/power190407

14. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulvelev I.R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag // *Proceedings of the International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
15. Энергосберегающее динамическое управление энергопотреблением электродуговых технологических агрегатов / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, А.С. Савинов, В.К. Дубровин // *Черные металлы*. 2018. № 12. С. 20–27.
16. Оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.В. Ануфриев и др. // *Сталь*. 2014. № 4. С. 37–47. DOI: 10.3103/s0967091214040135
17. Федорова С.В., Шеметов А.Н. Развитие диспетчеризации электрохозяйства промышленного предприятия как шаг к его цифровой трансформации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 3 (44). С. 27–33. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-3(44)-27-33
18. Карандаев А.С., Логинов Б.М., Гасиярова О.А. Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства // *Известия вузов. Электромеханика*. 2021. Т. 64, № 1. С. 54–68. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68
19. Направления исследований для повышения достоверности информации цифровой подстанции / А.В. Паздерин, П.В. Мурзин, И.Н. Одинаев, Ф.З. Бобокалонов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4 (45). С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11
20. Мухлынин Н.Д., Тащилин В.А. Применение технологий МЭК 61850 в электроэнергетике. Екатеринбург: УрФУ, 2020. 213 с.

References

1. Nikiforov G.V., Oleynikov V.K., Zaslavets B.I., Shemetov A.N. *Upravleniye energopotrebleniyem i energosberezheniyem. Teoriya i praktika: monogr.* [Energy management and energy saving. Theory and practice: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2013. 422 p. (In Russ.)
2. Shemetov A.N., Fedorova S.V., Kuznetsov S.V., Lyapin R.N. Modern problems and prospects of model forming of energy management at enterprises of mining and metallurgical complex. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2016;4(33):41–48. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-41-48
3. Koptsev L.A. *Energeticheskaya rezul'tativnost'. Metody uluchsheniya: opyt raboty* [Energy performance. Improvement Techniques: Work Experience]. Magnitogorsk: Magnitogorskiy dom pechati, 2019. 236 p. (In Russ.)
4. Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Gazizova O.V., Koptsev L.A. Power Supply at Metallurgical Iron-and-Steel Works: Features and Development Prospects. *Metallurgist*. 2021;65:783–793 DOI: 10.1007/s11015-021-01216-8
5. Varganova A.V., Djagarov N.F. Integrated optimization of industrial thermal power plants conditions. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2020;4(49):11–16. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2020-4(49)-11-16
6. Gazizova O.V., Varganova A.V., Malafeev A.V., Patshin N.T., Karyakin A.L. Taking into account static stability of synchronous generators when planning optimizing in-house power plants by reactive power. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2019;19(3):23–33. (In Russ.) DOI: 10.14529/power190303
7. Kanafeyev R.I., Zhirnov A.D., Klimova T.G. Optimal setting automatic excitation controllers for synchronous generators. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2016;(11–12);77–83. (In Russ.)
8. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R., Murzikov A.A. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh komplekсов metallurgicheskikh predpriyatiy: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Modeling of electrotechnical complexes of metallurgical enterprises: a textbook for universities]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2012. 237 p. (In Russ.)
9. Leyzerovich A.Sh. The last German coal power unit? *Elektricheskie stantsii*. 2021;(1);2–8. (In Russ.) DOI: 10.34831/EP.2021.1074.1.001
10. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektroснабзheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144–2013. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Electricity quality standards in general-purpose power supply systems]. Moscow: Standartinform; 2014. 19 p. (In Russ.)
11. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Shemetov A.N., Zhuravlev Yu.P., Murzikov A.A. Modern methods of reactive power compensation large steel actuators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. 2009;(1):28–31. (In Russ.)
12. Krubcov D.S. Improving stability of active rectifiers of electric rolling mills to unbalanced voltage. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2017;2(35):19–24. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2017-2(35)-19-24
13. Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Kovalenko A.Yu. Improving the Reliability of Steel Producing Units Electric Supply with Schematic Design Solutions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2019;19(4):59–69. (In Russ.) DOI: 10.14529/power190407
14. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulvelev I.R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag. *Proceedings of the International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*; 2019:1–4. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945

15. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Savinov A.S., Dubrovin V.K. [Energy-saving dynamic control of energy consumption of electric arc technological units]. *Chernye metally*. 2018;(12):20–27. (In Russ.)
16. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Pekhterev S.V., Povelitsa E.V. Electrical optimization of superpowerful arc furnaces. *Steel in Translation*. 2014;44(4):289–297. DOI: 10.3103/s0967091214040135
17. Fedorova S.V., Shemetov A.N. Development of electric facilities dispatching of industrial enterprise as a step to its digital transformation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2019;3(44):27–33. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2019-3(44)-27-33
18. Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarova O.A. Conceptual directions of creating digital twins for electrotechnical systems of rolling mill facilities. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 2021;64(1):54–68. (In Russ.) DOI: 10.17213/0136- 3360-2021-1-54-68
19. Pazderin A.V., Murzin P.V., Odinaev I.N., Bobokalonov F.Z. Survey of data reliability in digital substation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2019;4(45):4–11. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11
20. Mukhlynin N.D., Tashchilin V.A. *Primeneniye tekhnologiy MEK 61850 v elektroenergetike* [Application of IEC 61850 technologies in the electric power industry]. Ekaterinburg: UrFU; 2020. 213 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Корнилов Геннадий Петрович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; korn_mgn@mail.ru.

Шеметов Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; a.shemetov@magtu.ru.

Шохин Валерий Владимирович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; shww@mgn.ru.

Усатый Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Электроника и микроэлектроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; usatiydu@gmail.com.

Лыгин Максим Михайлович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; eligin@ya.ru.

Information about the authors

Gennadiy P. Kornilov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; korn_mgn@mail.ru.

Andrey N. Shemetov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; a.shemetov@magtu.ru.

Valeriy V. Shokhin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical, Magnitogorsk, Russia; shww@mgn.ru.

Dmitriy Yu. Usatyy, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Electronics and Microelectronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; usatiydu@gmail.com.

Maksim M. Lygin, Postgraduate Student of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical, Magnitogorsk, Russia; eligin@ya.ru.

Статья поступила в редакцию 26.11.2021; одобрена после рецензирования 16.12.2021; принята к публикации 29.12.2021.

The article was submitted 26.11.2021; approved after reviewing 16.12.2021; accepted for publication 29.12.2021.