DOI: *10.25515/PMI.2018.1.31*

УДК 621.398

СИСТЕМА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Б.Н.АБРАМОВИЧ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Обоснована актуальность проблемы компенсации провалов и отклонений напряжения в системах электроснабжения предприятий горной промышленности для обеспечения надлежащего уровня надежности энергообеспечения наиболее ответственных технологических потребителей. Выявлены основные причины возникновения провалов и отклонений напряжения в системах электроснабжения предприятий горной промышленности. Установлена степень влияния провалов и отклонений напряжения различной природы на динамическую и статическую устойчивость систем электроснабжения. Показана необходимость обеспечения бесперебойного и гарантированного режима электроснабжения непрерывных технологических процессов горного производства. Проведен анализ существующей нормативной документации в области гарантированного и бесперебойного электроснабжения. По результатам экспериментальных исследований и математического моделирования выявлено наличие взаимосвязи между формально независимыми с точки зрения существующей нормативной документации источниками электроснабжения. Приведено выражение, позволяющее определить коэффициент связанности двух источников электроснабжения. Обоснована необходимость учета степени взаимосвязанности источников при синтезе систем бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности. Выполнен анализ существующих технических средств и решений по резервированию электроснабжения для предприятий горной промышленности, включая современные источники бесперебойного питания, функционирующие в режиме онлайн, электростанции собственных нужд, а также динамические компенсаторы искажения напряжения. Приведена классификация категорий потребителей по возможности их полного или частичного отключения в аварийных режимах при провалах и прерываниях напряжения. Разработана система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности на основе комбинированного использования альтернативных и возобновляемых источников энергии, источников бесперебойного питания и устройства многоступенчатого автоматического ввода резерва, позволяющая обеспечить непрерывный режим энергообеспечения наиболее ответственных потребителей горных предприятий.

***Ключевые слова*:** горный, бесперебойный, электроснабжение, резервирование, генератор, альтернативный, возобновляемый, надежность

Как цитировать эту статью: Абрамович Б.Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 31-40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31

Введение. Проблема обеспечения непрерывного режима электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса РФ обусловлена удаленностью основных перспективных месторождений от централизованных энергосистем, территориальным рассредоточением производственных объектов и непрерывностью ключевых технологических процессов [1].

Передача электроэнергии от централизованной энергосистемы связана с возможностью возникновения кратковременных нарушений электроснабжения потребителей в виде провалов и исчезновения напряжения, первопричина которых различна [1]. Обеспечение промышленных объектов электроэнергией от электростанций энергосистемы по линиям электропередач (ЛЭП) связано с кратковременными нарушениями электроснабжения (КНЭ) потребителей (в большинстве случаев в виде исчезновений и провалов напряжения), которые возникают из-за коротких замыканий (КЗ) и грозовых повреждений. В случае отсутствия собственных электростанций КНЭ трансформируются непосредственно в системы электроснабжения (СЭС) предприятий, что может приводить к аварийным остановкам электрооборудования разных классов напряжения, влияя на ход технологического процесса горного производства.

Согласно положениям Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. поставлена задача повышения показателей бездефицитной работы централизованных энергосистем с 0,996 до 0,9997, что соответствует перерыву электроснабжения длительностью 36 ч в год и приближения данного показателя к международным нормам надежности [1]. Однако, согласно проведённым исследованиям и расчетам, выявлено, что уровень надежности централизованных сетей РФ находится в диапазоне 0,95-0,97, что ниже нормативного показателя (0,996) и соответствует перерыву электроснабжения 72 ч в год [14]. При этом переход на нормативный

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.31*

уровень надежности, регламентированный Энергетической стратегией РФ, даже в отдаленной перспективе потребует больших затрат в развитие и повышение надежности всех элементов централизованной энергосистемы. Даже в условиях таких мегаполисов как Санкт-Петербург длительность перерыва электроснабжения может достигать 72 ч в год.

Наиболее перспективной и эффективной альтернативой существующим централизованным электрическим сетям являются системы распределенной генерации с комбинированным использованием альтернативных и возобновляемых источников энергии [2, 3]. Для условий горных предприятий для повышения надежности энергообеспечения наиболее ответственных потребителей в соответствии с Энергетической стратегией РФ необходима параллельная работа централизованных электрических сетей с системой распределенной генерации на основе комбинированной работы ветроэнергетических установок, солнечных электростанций и генераторных установок, работающих на органическом топливе, с быстродействующими устройствами многоступенчатого автоматического ввода резерва [4-6].

Постановка проблемы. Как уже отмечалось, провалы могут стать следствием не только коротких замыканий во внешних или внутренних СЭС предприятия, но непосредственно на месте электропотребления вследствие включения мощных асинхронных электродвигателей, пусковые токи которых в 7-8 раз превосходят номинальные. Отдельного рассмотрения требует случай группового самозапуска электродвигателей. При этом необходимо разделять поведение энергетической системы промышленных объектов при различном характере изменений и возмущений, что будет определяться типом ее устойчивости [7, 11].

Электроснабжение электроприемников первой категории с особо сложным, непрерывным технологическим процессом, требующим длительного времени на восстановление нормального режима, при наличии технико-экономических обоснований рекомендуется осуществлять от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, к которым предъявляются дополнительные требования, определяемые особенностями технологического процесса.

Методология проведения исследований. При проведении исследований необходимо учитывать различия между терминами гарантированное и бесперебойное электроснабжение объекта. Гарантированным является режим электроснабжения от основного и одного или нескольких резервных источников питания, при котором гарантируется ограничение длительности возможных кратковременных перерывов при электроснабжении потребителей предприятия. Таким образом, наличие кратковременных нарушений электроснабжения в этом случае допускается. Бесперебойным является режим электроснабжения от основного и одного или нескольких резервных источников, при котором энергообеспечение потребителей предприятия осуществляется в непрерывном режиме. Кроме того, источники электроснабжения ответственных объектов должны быть взаимно резервируемыми [9, 20].

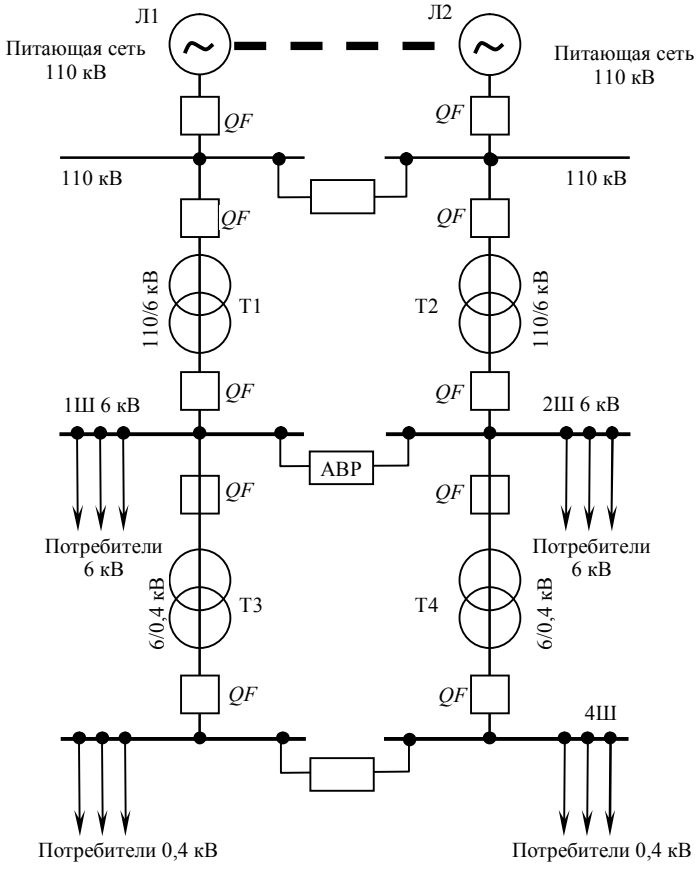


Рис.1. Обобщенная схема ЭС для горных предприятий

Обобщенная структура СЭС горного предприятия при питании от единой энергосистемы представлена на рис.1. Для данной схемы характерно наличие электромагнитной связи между линиями Л1 и Л2 [12, 13], т.е. источники питания шин 6(10) кВ не являются независимыми. Выполним оценку показателей надежности электроснабжения потребителей для

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.31*

условий ООО «Киришинефтеоргсинтез», ПАО «Татнефть» и ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» с учетом риска возникновения аварий по критерию устойчивости технологических процессов.

Оценка независимости источников электропитания потребителей производилась с использованием коэффициента связанности источников питания:

$$k_{\text{св}(j,i)} = \frac{\Delta U_j^{\text{КЗ}i} U_{i\text{н}}}{\Delta U_i^{\text{КЗ}} U_{j\text{н}}},$$

где $k_{\text{св}(j,\,i)}$ – коэффициент связанности j-го источника питания относительно i-го; $\Delta U_i^{\text{КЗ}}$ – отклонение напряжения на i-м источнике при коротком замыкании (КЗ); $\Delta U_j^{\text{КЗ}i}$ – отклонение напряжения на j-м источнике при КЗ на i-м; $U_{i\text{н}}$ – номинальное напряжение на i-м источнике; $U_{j\text{н}}$ – номинальное напряжение на j-м источнике.

При возникновении КЗ на 1Ш в условиях ООО «Киришинефтеоргсинтез» напряжение на Ш2 снижалось до $0{,}6U_{\text{ном}}$ при снижении напряжения на поврежденной секции до $0{,}24U_{\text{ном}}$ (где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение на шинах), т.е. коэффициент связанности зависимых источников $k_{\text{св}} = 0{,}4$. Длительность процессов КЗ составила 0,184 с и привела к отключению 40 технологических установок, получающих электропитание от шин 1Ш. После отключения КЗ часть технологических установок, подключенных к шинам 2Ш, восстановила нормальную работу путем самозапуска приводных двигателей. Фазные токи и напряжения процессов в период рассмотренного аварийного режима приведены на рис.2.

В условиях ПАО «Татнефть» проводились исследования устойчивости электроснабжения при повреждениях в промысловых линиях 6(10)/0,4 кВ предприятия Ашальчинского месторож-

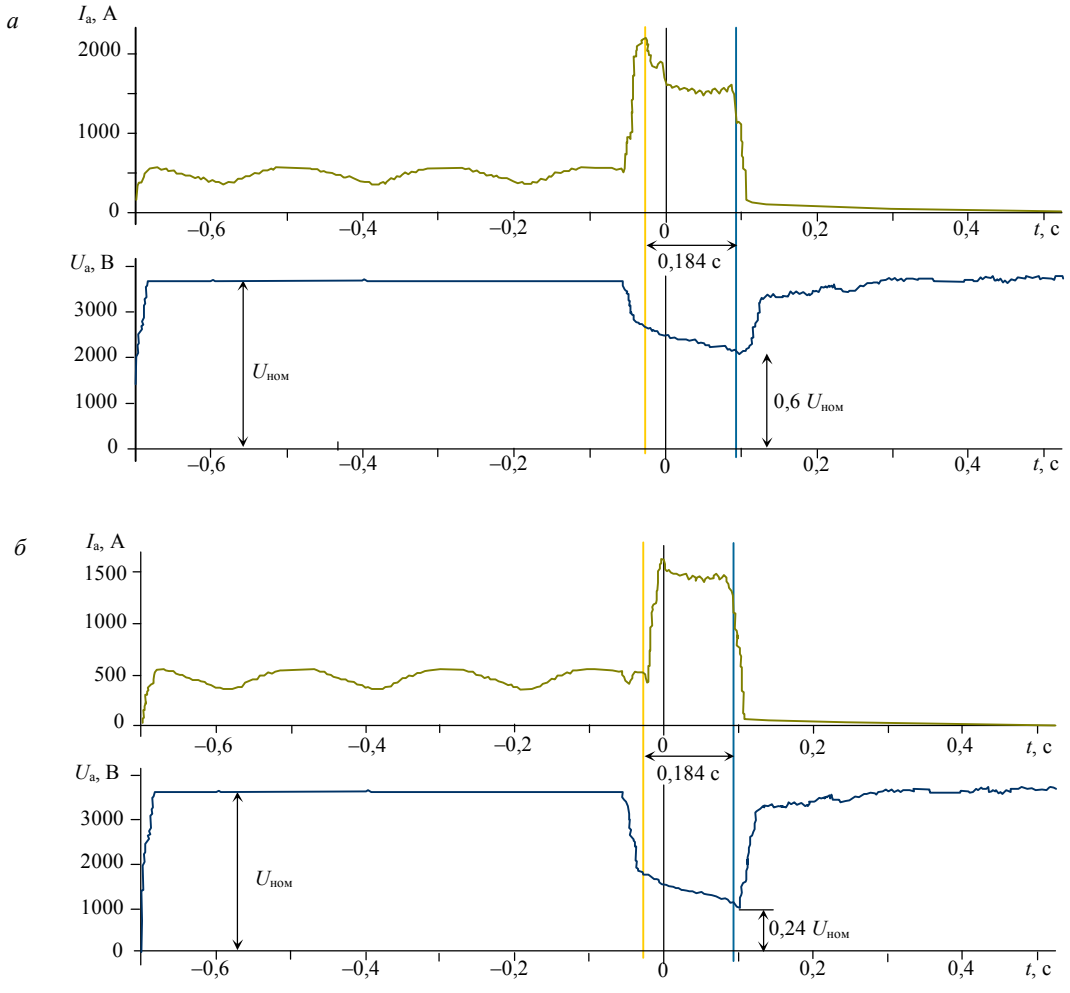


Рис.2. Ток и напряжение фазы А на сборках шин 1Ш (*а*) и 2Ш (*б*)

дения с трудно извлекаемыми запасами углеводородов. Для обеспечения технологического процесса добычи на указанном месторождении введена котельная из шести агрегатов общей мощностью 150 МВт, генерирующих пар для закачки в скважины. Питание вентиляторов и дымососов производилось от двух секций 1Ш и 2Ш сборных шин напряжением 0,4 кВ, непосредственно не связанных между собой. Помимо значительных затрат на электроэнергию возникали проблемы обеспечения устойчивости процесса парогенерации из-за перебоев и отказов, вызванных повреждениями в системах внешнего и внутреннего электроснабжения.

В течение полугода было зарегистрировано более 40 аварийных остановок процесса парогенерации, что приводило к нарушению непрерывности технологического процесса добычи. Для установления причины аварийных остановок, вызванных КНЭ в ЕЭС и внешней СЭС месторождения, а также связанностью питающих линий на стороне высшего напряжения, производился контроль качества электроэнергии с помощью приборов «Ресурс-UF» [8, 17, 18].

В таблице приведены некоторые результаты замеров показателей качества электроэнергии в указанных сетях с помощью приборов «Ресурс-UF». Провалы напряжения на секции 1Ш длительностью до 0,24 с достигали 70 % и приводили к отключению вентиляторов и дымососов котельной. Провалы напряжения на секции 2Ш достигали таких же значений и приводили к отключению соответствующих технологических установок.

Глубина и длительность провалов напряжения на фазах А, В и С сборных шин 0,4 кВ, не связанных электрически

Время	Секция 1Ш. Ресурс UF № 1677						Секция 2Ш. Ресурс UF № 861					
	Фаза А		Фаза В		Фаза С		Фаза А		Фаза В		Фаза С	
	δU, %	$\Delta t_{пр}$, с	δU, %	$\Delta t_{пр}$, с	δU, %	$\Delta t_{пр}$, с	δU, %	$\Delta t_{пр}$, с	δU, %	$\Delta t_{пр}$, с	δU, %	$\Delta t_{пр}$, с
9:09:52	65,900	0,170	71,800	0,240	70,600	0,160	69,6	0,23	64,3	0,23	70,7	0,24
9:17:06	51,400	0,080	50,800	0,090	51,800	0,100	47,8	0,08	48,3	0,09	48,8	0,08
9:41:15	37,200	0,110	37,000	0,120	37,100	0,110	34,1	0,09	34,2	0,09	33,5	0,09

Для обобщенной оценки связанности источников питания было выполнено имитационное моделирование процессов двух- и трехфазных КЗ на шинах подстанций внешнего и внутреннего электроснабжения.

Оценка степени связанности питающих линий от единой энергосистемы выполнена с использованием имитационного моделирования в среде MatLab Simulink. На основе результатов имитационного моделирования процессов двух- и трехфазных КЗ на шинах подстанций внешнего и внутреннего электроснабжения дана обобщенная оценка вариации связанности питающих линий электропередачи.

Установлено, что при вариации степени взаимодействия и параметров питающих линий изменение коэффициента связанности находится в пределах от 0 до 0,7, что не позволяет применять быстродействующие и тиристорные системы (БАВР и ТАВР), динамические компенсаторы искажения напряжения [10, 16] ввиду глубоких провалов напряжения на смежных с неповрежденными секциях электроподстанций и питающими линиях.

Для повышения устойчивости технологических процессов на предприятиях газотранспортных систем наряду с питанием от энергосистемы было предусмотрено электроснабжение от автономных дизельных генераторов (АДГ) ограниченной мощности, в частности на установке подготовки газа к закачке (УПГЗ) компрессорной станции «Портовая». Соотношение мощностей трансформаторной подстанции, подключенной к энергосистеме, и дизельных генераторов составляет 0,05 кВ и менее. В этих условиях возникла проблема оценки допустимости качества электроэнергии, генерируемой резервными генераторами. Результаты измерений показателей качества электрической энергии, генерируемой резервными источниками УПГЗ, удовлетворяют требованиям ГОСТ 32144-2013. Коэффициент гармонических искажений не превышает 2,38 %. Стоимость электроэнергии, генерируемой АДГ, сопоставима со стоимостью электроэнергии, потребляемой от энергосистемы. Использование АДГ совместно с энергосистемой позволяет повысить устойчивость и предотвратить срыв технологического процесса транспорта газа, а также значительно снизить вероятность аварий УПГЗ.

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31

Анализ перспективных технических средств и решений. Эффективность ввода резерва оценивается временем перерыва в электроснабжении с момента отключения электропотребителя от основного источника питания до переключения на резервный.

Быстрое включение резервного элемента возможно только средствами автоматики. Устройства, которые осуществляют такое включение, называются устройствами автоматического включения резерва (АВР).

В качестве средств резервирования ответственных электропотребителей можно привести следующие типы электротехнических устройств:

– электростанции собственных нужд (ЭСН) различного типа;

– источники бесперебойного питания (статические и динамические);

– динамические компенсаторы искажения напряжения.

На зависимость источников питания большое влияние оказывает сопротивление системы: чем больше сопротивление, тем выше коэффициент связи. Например, при сопротивлении связи 0,1 о.е. и системы 0,05 о.е. коэффициент связи равен 0,1, тогда как при сопротивлении системы 0,3 о.е. коэффициент связи возрастет и станет равным 0,39. На величину коэффициента связи также оказывает влияние сопротивление связи. Очевидно, чем меньше сопротивление связи, тем выше зависимость источников питания. Например, при сопротивлении системы 0,5 о.е. и связи 0,5 о.е. коэффициент связи равен 0,28, тогда как при сопротивлении связи 0,1 о.е. коэффициент связи возрастет и станет равным 0,492.

Недостатком существующих систем гарантированного питания является невозможность подзарядки аккумуляторных батарей от резервного генератора – может возникнуть необходимость обратного переключения с резервного источника питания на основной источник электроснабжения, а уровень заряда аккумуляторных батарей может оказаться недостаточным для поддержания работы неотключаемых потребителей во время переключения и синхронизации фаз выходных напряжений генераторов, а в случае отказа обоих генераторов – для безаварийного завершения технологического процесса.

Поэтому ключевым отличительным признаком разрабатываемой системы бесперебойного электроснабжения является обеспечение многоступенчатого автоматического ввода резерва (в данном случае рассматриваются две ступени ввода резерва) при поддержании необходимого уровня заряда аккумуляторных батарей, и тем самым осуществляя бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей.

Предлагаемое техническое решение. Разработанная система бесперебойного электроснабжения, подключенная к основному источнику питания, содержит резервный источник питания, а также в составе блока развязки с энергосистемой имеет зарядное устройство, соединенное через выпрямитель и выключатель с шинами переменного тока резервного генератора, тем самым обеспечивая необходимый уровень заряда аккумуляторных батарей для электроснабжения неотключаемых потребителей при последующем переключении между генераторами. Структура данной системы приведена на рис.3 [15].

Для этого также разработана многоступенчатая система автоматического ввода резерва, обеспечивающая бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей объектов минерально-сырьевого комплекса.

Категорийность отключения нагрузки – это разделение всей питаемой нагрузки на категории, которое подразумевает порядок отключения: в случае полностью отключаемой ступени нагрузки (ПОН), отключения частично отключаемой нагрузки (ЧОН) или снижения ее энергопотребления, а также важность ступени неотключаемой нагрузки (НН) в технологическом процессе. В этом случае осуществляется электроснабжение комплекса для безаварийного завершения технологического процесса, когда требуется поддерживать работу определенной группы электропотребителей.

Предложенная система функционирует следующим образом. В нормальном режиме электроснабжение всех потребителей проводят автономной электростанцией 1. При возникновении аварийной ситуации в работе автономной электростанции 1, во время запуска и выхода на номинальный режим резервного генератора 2, электроснабжение ответственных неотключаемых потребителей осуществляется за счет отдачи энергии аккумуляторной батареей. Ликвидацию дефицита мощности резервного генератора 2 проводят путем поочередного отключения потребителей в

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.31*

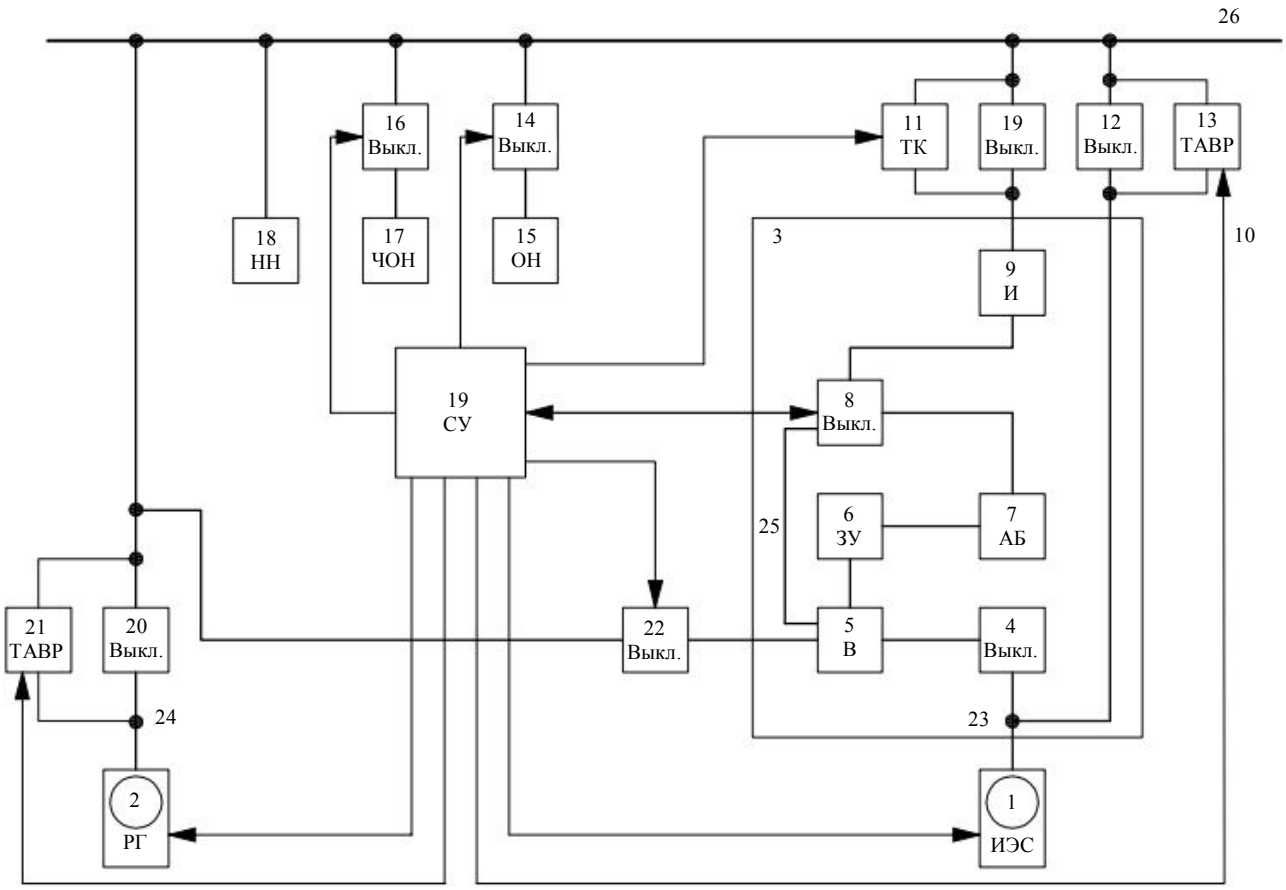


Рис.3. Структура схемы системы бесперебойного электроснабжения

1 – автономная электростанция; 2 – резервный генератор; 3 – блок развязки с энергосистемой; 4 – выключатель для подключения выпрямителя к шине автономной электростанции; 5 – выпрямитель; 6 – зарядное устройство; 7– аккумуляторная батарея; 8 – выключатель для подключения аккумуляторной батареи к инвертору, а также обеспечивающий питание от аккумуляторных батарей и выпрямителя; 9 – инвертор; 10 – выключатель для подключения инвертора к главной шине переменного тока; 11 – тиристорный коммутатор; 12 – выключатель для подключения автономной электростанции к главной шине переменного тока; 13 – тиристорное устройство автоматического ввода резерва; 14 – средства автоматического отключения полностью отключаемых потребителей; 15 – полностью отключаемые потребители; 16 – средства автоматического отключения частично отключаемых потребителей; 17 – частично отключаемые потребители; 18 – неотключаемые потребители; 19 – система управления; 20 – выключатель для подключения резервного генератора; 21 – тиристорное устройство автоматического ввода резерва; 22 – выключатель, подключающий выходные шины переменного тока резервного генератора к выпрямителю; 23, 24 – шины переменного тока, запитанные от автономной электростанции и резервного генератора соответственно; 25 – шины постоянного тока, соединяющие выпрямитель с выключателем для подключения аккумуляторной батареи к инвертору; 26 – главные шины переменного тока

соответствии со ступенями разгрузки. Алгоритм переключения между тремя источниками электроснабжения и согласование их совместной работы заложен в системе управления 19. При запуске резервного генератора 2 и его последующем подключении ответственные потребители получают питание от аккумуляторной батареи 7.

Синхронизация одноименных напряжениий $U_{И}$ на выходе инвертора 9 и $U_{РГ}$ резервного генератора 2 обеспечивается с помощью блоков тиристорного коммутатора 11 и тиристорного автоматического ввода резерва 21. Подключение резервного генератора 2 к главной шине переменного тока 26 при исключении токовых перегрузок возможно при соблюдении угла фазового рассогласования между соответствующими напряжениями в пределах 30 электрических градусов. В противном случае возрастает ток вплоть до двукратного в случае подключения резервного генератора 2 к главной шине переменного тока 26 в момент нахождения фаз в противофазе. Это приводит к срабатыванию устройств релейной защиты и электросетевой автоматики с возникновением перерыва электроснабжения, приводящего к нарушению технологического процесса.

Для подключения резервного генератора 2 без рассогласования фаз между его выходным напряжением с выходным напряжением инвертора 9 параллельно выключателю 20 присоединяется тиристорное устройство автоматического ввода резерва 21. Тиристорное устройство автома-

тического ввода резерва предназначено для сохранения в работе неотключаемых потребителей в случае возникновения аварийной ситуации, связанной с потерей питающего напряжения на одном из рабочих вводов, с помощью максимально быстрого переключения на оставшийся в работе ввод без возникновения токовых перегрузок.

Оптимизация переходных процессов по критерию минимизации фазового рассогласования напряжений источников обеспечивается синхронизацией момента включения тиристорного устройства 21 автоматического ввода резерва с углом рассогласования фаз напряжений на зажимах генератора с напряжением на выходе инвертора в диапазоне от 0 до 30 электрических градусов, а также происходит контроль процесса восстановления напряжения в СЭС с автоматическим переключением на штатную схему электроснабжения после восстановления напряжения на вводе, где произошел отказ.

При восстановлении нормального режима электроснабжения от автономной электростанции 1 также существует риск увеличения угла рассогласования фаз между одноименными напряжениями $U_{АЭС}$ на выходе автономной электростанции 1 и $U_{РГ}$ резервного генератора 2. Для предотвращения этого параллельно выключателю 12 подключено тиристорное устройство автоматического ввода резерва 13. После ликвидации аварийного режима срабатывает тиристорный коммутатор 11, включенный параллельно выключателю 10, для исключения перетока энергии от инвертора 9 в сеть. Система управления 19 контролирует совместную работу тиристорных устройств автоматического ввода резерва 13 и 21 и тиристорного коммутатора 11 для обеспечения синхронизации ввода в работу различных источников электроснабжения.

При этом во время аварийного режима отданная энергия аккумуляторных батарей 7 на питание особо ответственных неотключаемых потребителей 18 при переключении с автономной электростанции 1 на резервный генератор 2 должна быть восстановлена до номинального уровня, что достигается за счет наличия выключателя 22, подключающего шины переменного тока 24 резервного генератора 2 к блоку выпрямителя 5. Зарядное устройство 6 обеспечивает и поддерживает необходимый уровень заряда на аккумуляторных батареях 7, а выключатель 8 не допускает перетока мощности в инвертор 9, а также обеспечивает постоянное питание системы управления 19. В случае неисправности на аккумуляторных батареях 7 предусматривается питание системы управления по шинам постоянного тока 25, соединяющим выключатель 8 и выпрямитель 5.

Команды на отключение отключаемых потребителей, питание критической нагрузки, а также запуск резервных генераторов, должны поступать синхронно [21]. Кроме того, блок развязки с энергосистемой может быть заменен на источник бесперебойного питания двойного преобразования, работающего в режиме онлайн [22].

Мощность аккумуляторных батарей (АБ) должна выбираться с учетом постоянного питания системы управления при поддержании номинального режима работы особо ответственных неотключаемых потребителей на время переключения между автономной электростанцией и резервным генератором, а в случае невозможности запуска резерва емкость АБ должна обеспечить безаварийное завершение технологических процессов на неотключаемых потребителях, что позволит минимизировать экономические ущербы.

Выбор мощности и типа источников питания во многом обусловливают показатели надежности электроснабжения и качества электроэнергии, а также экономичность проектируемых электросетей.

Для выбора источника бесперебойного питания (ИБП), способного обеспечить непрерывную подачу электроэнергии ответственной нагрузке во время КНЭ, а также время запуска резервной генераторной установки необходимо определить его параметры: мощность источника, время автономной работы, тип и емкость применяемых накопителей электрической энергии.

Выбор мощности источника бесперебойного питания $S_{ИБП}$ должен осуществляться на основе анализа графиков электрической нагрузки с учетом их статических характеристик и исходя из ограничений, обусловленных длительностью запуска резервного источника питания в составе системы многоступенчатого ввода резерва и допустимой глубиной провала напряжения и необходимостью обеспечения динамической устойчивости потребителей первой и особой группы.

Номинальная мощность ИБП определяется по формуле

$$S_{\text{н.ИБП}} \geq \frac{k_{\text{з}}(1U_{\text{д}})S_{\text{нг}}K_{\text{нг.э}}}{K_{\text{ИБП}}},$$

где $k_{\text{з}} = 1{,}1\text{-}1{,}2$ – коэффициент запаса в соответствии с рекомендациями ИБП; $U_{\text{д}}$ – допустимое снижение питающего напряжения по условию обеспечения динамической устойчивости электропотребителей; $K_{\text{нг.э}}$ и $K_{\text{ИБП}}$ – соответственно эквивалентный входной коэффициент мощности нагрузки и выходной коэффициент мощности ИБП.

Запасенной в накопителях ИБП должно быть достаточно для обеспечения нормальной работы потребителей на время срабатывания устройства АВР $t_{\text{АВР}}$ и запуска и приема нагрузки независимым источником (генератором), т.е. время работы от аккумуляторных батарей должно удовлетворять условию

$$t_{\text{АБ}} \geq \begin{cases} t_{\text{АВР}} \\ t_{\text{зап.ген}} + t_{\text{приема}} \end{cases}.$$

Емкость аккумуляторной батареи

$$C_{\text{ак}} \geq \frac{I_{\text{АБ}}t_{\text{АБ}}}{K_g K_P},$$

где $C_{\text{ак}}$ – необходимая емкость, А·ч; $I_{\text{АБ}}$ – ток, потребляемый от АБ в период АВР, А; $t_{\text{АБ}}$ – время работы АБ в период АВР, ч; K_g – коэффициент доступной емкости, о.е.; $K_{\text{р}} = 0{,}5\text{-}0{,}7$ – рекомендуемый в зависимости от типа АБ коэффициент глубины разряда аккумулятора.

Ток, потребляемый от аккумуляторной батареи в период АВР, определяется по формуле

$$I_{\text{АБ}} = \frac{P_{\text{нагр}}}{\eta_{\text{И}}U_{\text{АБ}}},$$

где $P_{\text{нагр}}$ – средняя мощность нагрузки, Вт; $\eta_{\text{И}} = 0{,}9\text{-}0{,}95$ – КПД преобразования постоянного тока в переменный с помощью инвертора; $U_{\text{АБ}}$ – номинальное напряжение АБ, В.

Для повышения надежности функционирования системы бесперебойного электроснабжения необходимо предусмотреть обеспечение своевременного вывода резервных генераторов на технические осмотры, текущие и капитальные ремонты без снижения номинальной нагрузки электростанции, а также влияние на уровень надежности агрегатов аварийных (внеплановых) ремонтов и резервирования.

Обсуждение. Отличительной особенностью разработанной системы бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности является комбинированное функционирование автономных источников с различными параметрами в рамках единого электротехнического комплекса. При возникновении аварийных режимов со стороны централизованной энергосистемы источники бесперебойного питания обеспечивают непрерывность энергообеспечения на время пуска и выхода на номинальный режим генераторов или безаварийное завершение технологического процесса. Переключение энергообеспечения между источниками осуществляется быстродействующими тиристорными коммутаторами за время, не превышающее допустимой длительности перерыва электроснабжения наиболее ответственных потребителей. Применительно к промышленным условиям разработанная система точных аналогов не имеет, подобные устройства за рубежом реализованы только для энергообеспечения бытовых потребителей.

Выводы

1. Обоснована актуальность проблемы компенсации провалов и отклонений напряжения в системах электроснабжения предприятий горной промышленности для обеспечения надлежащего уровня надежности энергообеспечения наиболее ответственных технологических потребителей.

2. Выявлены основные причины возникновения провалов и отклонений напряжения в системах электроснабжения предприятий горной промышленности.

3. Установлена степень влияния провалов и отклонений напряжения различной природы на динамическую и статическую устойчивость систем электроснабжения.

4. По результатам экспериментальных исследований и математического моделирования выявлено наличие взаимосвязи между формально независимыми с точки зрения существующей нормативной документации источниками электроснабжения.

5. Выполнен анализ существующих технических средств и решений по резервированию электроснабжения для предприятий горной промышленности, включая современные источники бесперебойного питания, функционирующие в режиме онлайн, электростанции собственных нужд, а также динамические компенсаторы искажения напряжения.

6. Разработана система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности на основе комбинированного использования альтернативных и возобновляемых источников энергии, источников бесперебойного питания и устройства многоступенчатого автоматического ввода резерва, позволяющая обеспечить непрерывный режим энергообеспечения наиболее ответственных потребителей горных предприятий.

Благодарность. *Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации государственного задания «Разработка научно обоснованных методов и средств синтеза структуры и реализации централизованных, автономных и комбинированных систем электроснабжения повышенной надежности с использованием альтернативных и возобновляемых источников для бесперебойного энергообеспечения предприятий с непрерывным технологическим циклом на основе логико-вероятностных оценок», проект № 13.3746.2017/ПЧ.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамович Б.Н.* Проблемы обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Сычев // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 132-139.

2. *Абрамович Б.Н.* Выбор параметров ветродизельной установки для энергообеспечения минерально-сырьевого комплекса / Б.Н.Абрамович, А.А.Бельский // Записки Горного института. 2012. Т. 195. С. 227-230.

3. *Абрамович Б.Н.* Фотоэлектрическая станция прямого преобразования для объектов минерально-сырьевого комплекса / Б.Н.Абрамович, Э.В.Яковлева // Записки Горного института. 2012. Т. 196. С. 210-213.

4. *Абрамович Б.Н.* Методы и средства обеспечения энергетической безопасности промышленных предприятий с непрерывным технологическим циклом / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Сычев // Промышленная энергетика. 2016. № 9. С. 18-22.

5. *Абрамович Б.Н.* Многоступенчатая система автоматического ввода резерва на основе источников бесперебойного питания в системах электроснабжения объектов горных предприятий / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Сычев, А.В.Федоров // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 6(115). С. 17-20.

6. *Абрамович Б.Н.* Энергетическая безопасность технологических процессов добычи нефти / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Сычев // Нефтяное хозяйство. 2016. № 9. С. 120-123.

7. *Абрамович Б.Н.* Динамическая устойчивость работы установок электроцентробежных насосов / Б.Н.Абрамович, Д.А.Устинов, В.Е.Поляков // Нефтяное хозяйство. 2010. № 9. С. 104-106.

8. *Абрамович Б.Н.* Комплексная система контроля качества электрической энергии на предприятиях по добыче и переработке полезных ископаемых // Записки Горного института. 2008. Т. 178. С. 110-115.

9. *Быстрицкий Г.Ф.* Установки автономного и резервного электроснабжения // Промышленная энергетика. 2008. № 2. С. 13-23.

10. *Гамазин С.И.* Обеспечение надежности электроснабжения и качества электроэнергии / С.И.Гамазин, В.М.Пупин, Ю.В.Марков // Промышленная энергетика. 2006. № 11. С. 51-56.

11. *Ершов М.С.* Развитие теории устойчивости промышленных электротехнических систем и методов управления ими / М.С.Ершов, А.В.Егоров, А.А.Трифонов // Территория Нефтегаз. 2010. № 3. С. 108-115.

12. *Ершов М.С.* Оценка взаимной зависимости источников питания систем промышленного электроснабжения с учетом несимметричных возмущений во внешних электрических сетях / М.С.Ершов, В.А.Анцифоров, А.Н.Комков // Промышленная энергетика. 2014. № 11. С. 2-7.

13. *Ершов М.С.* Рекомендации по повышению надежности работы потребителей производственных объектов при авариях в системах централизованного электроснабжения // Территория Нефтегаз. 2012. № 12. С. 88-91.

14. *Овсейчук В.А.* Надежность и качество электроснабжения потребителей // Новости электротехники. 2013. № 3. С. 50-53.

15. Патент № 2576664 РФ. Система бесперебойного электроснабжения / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Сычев, А.В.Федоров, А.А.Бельский. Заявл. 19.03.2015. Опубл. 10.03.2016. Бюл. № 7.

16. Современные способы повышения надежности электроснабжения потребителей напряжением 10, 6 и 0,4 кВ / С.И.Гамазин, В.М.Пупин, Р.В.Зелепугин, А.Р.Сабитов // Промышленная энергетика. 2008. № 8. С. 20-23.

17. *Сычев Ю.А.* Измерение и анализ показателей качества электрической энергии в сетях нефтедобывающих предприятий // Записки Горного института. 2007. Т. 173. С. 109-111.

18. *Сычев Ю.А.* Системы коррекции кривых тока и напряжения // Записки Горного института. 2006. Т. 167. Ч. 1. С. 190-193.

19. *Сычев Ю.А.* Экспериментальные исследования режимов работы параллельного активного фильтра в сетях ОАО «Оренбургнефть» // Записки Горного института. 2009. Т. 182. С. 114-117.

20. *Федоров А.В.* Применение источников бесперебойного питания в энергетических установках промышленных объектов в нефтегазовой отрасли / А.В.Федоров, С.В.Бабурин, А.Н.Махалин // Наука и техника в газовой промышленности. 2014. № 2. С. 70-74.

21. *Abramovich B.N.* Intelligent power system on the base of active-adaptive control and interaction between elements / B.N.Abramovich, Yu.A.Sychev, A.A.Belsky // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. P. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147230

22. *Abramovich B.N.* The Application of Modern Information Technologies for Power Monitoring and Control in Conditions of Distributed Generation / B.N.Abramovich, V.B.Prochorova, Yu.A.Sychev // Proceeding of the 16th conference of FRUCT association, 27-31 Oct., Oulu (Finland). 2014. P. 3-8. DOI: 10.1109/FRUCT.2014.7000938

Автор **Б.Н.Абрамович**, *д-р техн. наук, профессор, babramov@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 7.02.2017