

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Динамические характеристики резервных источников



Гусев Юрий Павлович,
к.т.н., профессор,
заведующий кафедрой
«Электрические станции»
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»



Гусев Олег Юрьевич,
ассистент кафедры
«Электрические станции»
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»



Окнин Евгений Петрович,
инженер кафедры
«Электрические станции»
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»



Чо Гван Чун,
к.т.н., доцент, заместитель
заведующего кафедрой
«Электрические станции»
по научной работе,
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

МНОГИЕ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКИ НЕФТЕ- И ГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НУЖДАЮТСЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ КАТЕГОРИИ НАДЕЖНОСТИ. ПЕРЕРЫВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТАКИХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПРИВОДИТ К СБОЯМ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И, КАК СЛЕДСТВИЕ, К ЗНАЧИТЕЛЬНОМУ МАТЕРИАЛЬНОМУ УЩЕРБУ. СИСТЕМЫ РЕЗЕРВНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ (СРЭ), НА БАЗЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ ИЛИ ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК В СОЧЕТАНИИ С АККУМУЛЯТОРНЫМИ БАТАРЕЯМИ И ИНВЕРТОРАМИ МОГУТ ОБЕСПЕЧИТЬ ВЫСОКУЮ НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПОДДЕРЖИВАТЬ КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА УРОВНЕ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ. ОСОБЕННО ВЫСОКИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ПРОВАЛАМ И ВЫБРОСАМ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕДЪЯВЛЯЮТ СОВРЕМЕННЫЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА, ИНТЕГРИРОВАННЫЕ В КОНТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ, СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАЩИТ. ДО НАСТОЯЩЕГО ВРЕМЕНИ НЕТ МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ СОГЛАСОВАТЬ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТ СИСТЕМ РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ ДРУГ С ДРУГОМ И С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ. ПРОЕКТНЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ ИСПЫТЫВАЮТ ЗАТРУДНЕНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТАКИХ СИСТЕМ, ОСОБЕННО ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ, ПО ВОПРОСАМ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ, ВЫЗЫВАЕМЫХ РЕЗКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ НАГРУЗКИ И КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ. ОСНОВНОЙ ПРИЧИНОЙ ЗАТРУДНЕНИЙ ЯВЛЯЕТСЯ СЛОЖНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ СРЭ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ КАК КЛАССИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ, ТАК И СОВРЕМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМИ СИСТЕМАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТАКИХ СИСТЕМАХ ВОЗМОЖЕН ЛИШЬ С ПОМОЩЬЮ ВЕСЬМА СЛОЖНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ. ФАКТОРОМ, ЗАТРУДНЯЮЩИМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СРЭ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ЯВЛЯЕТСЯ НЕДОСТАТОК НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ, ОСОБЕННО НАЦИОНАЛЬНЫХ И ОТРАСЛЕВЫХ. В ДАННОЙ СТАТЬЕ ПРИВЕДЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СРЭ ГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО НА КАФЕДРЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ» НИУ «МЭИ»

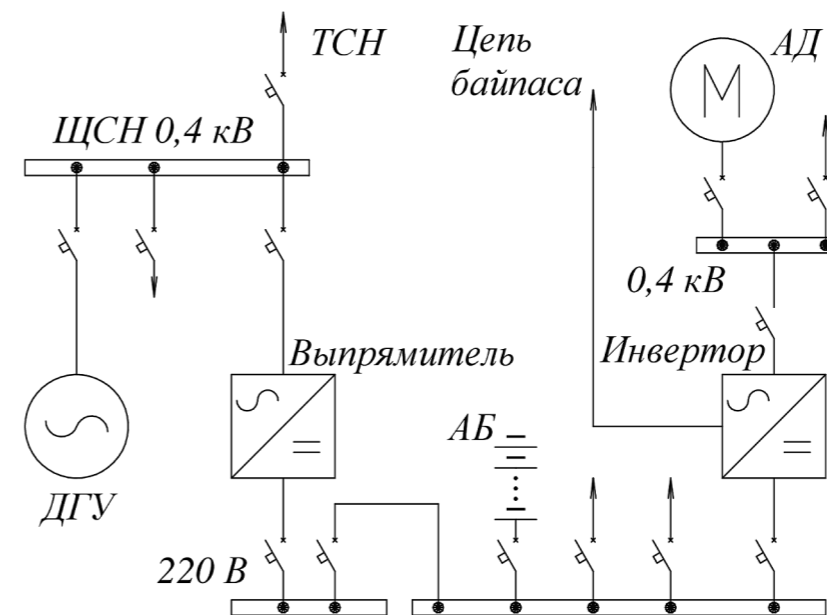
KEY WORDS: *energy services, natural gas production, redundant, diesel generators, industrial gas engine.*

В составе электроприемников СРЭ могут быть электроприводы насосов, клапанов и задвижек трубопроводов, резервное освещение, системы контроля и управления. В послеаварийном режиме, питание электроприемников второй группы СРЭ предусматривается от дизель-генераторов, а электроприемников первой группы – от дизель-генераторов и аккумуляторных батарей.

Объем научных исследований режимов работы СРЭ, количество и качество нормативных документов, необходимых для их проектирования и эксплуатации, не соответствуют важности вопроса и масштабам возможных последствий отказов СРЭ. Известные международные, национальные и отраслевые стандарты [1,2] содержат неоднозначные, а иногда и противоречивые

УДК 622.276.6

РИС. 1. Принципиальная схема СРЭ



требования к оборудованию СРЭ. Особенно это относится к параметрам, регламентирующим электромагнитную совместимость и условия срабатывания защит, при возникновении переходных процессов в полупроводниковых преобразовательных устройствах, вызываемых резкими изменениями нагрузки и короткими замыканиями в электроустановках добывающих предприятий и в примыкающих к ним участках электрической сети.

В последние годы, в выпрямителях и инверторах СРЭ, вместо тиристоров, используются новые полупроводниковые элементы – MOSFET и IGBT силовые транзисторы, вместо аналоговых применяются цифровые регуляторы. Новая элементная база существенно изменяет динамические характеристики СРЭ, повышается трудоемкость расчета режимов и анализа переходных процессов. Для проведения научных исследований современных СРЭ, использующих электрические машины в сочетании с современными устройствами преобразовательной техники, необходимы новые математические модели. В данной статье приведены результаты работы, выполненной на кафедре «Электрические станции» НИУ «МЭИ», в ходе которой была разработана математическая

модель современной СРЭ и с ее помощью проанализирована электромагнитная совместимость оборудования СРЭ, соответствие его требованиям действующих международных, национальных и отраслевых стандартов.

Верификация разработанной математической модели была осуществлена путем сопоставления результатов компьютерных расчетов с результатами натурных экспериментов, проведенных в учебно-исследовательском центре (УИЦ) кафедры «Электрические станции». УИЦ был создан на кафедре в рамках программы развития Национального исследовательского университета «МЭИ», для него были закуплены комплексы инновационного оборудования, произведенного швейцарской фирмой GUTOR Electronic LLC, входящие в состав системы оперативного постоянного тока и системы собственных нужд переменного тока.

Расчетно-теоретическое исследование выполнено применительно к СРЭ, осуществляющей питание электроприводов насосов, клапанов и задвижек трубопроводов, аварийного освещения, системы контроля и управления технологическим оборудованием, рис. 1. Были проанализированы переходные

процессы, вызванные пуском асинхронных двигателей, при отключении рабочего трансформатора (ТЧН) и переводе питания СРЭ на дизель-генераторную установку (ДГУ). Номинальные параметры ДГУ, выпрямителя, аккумуляторной батареи (АБ), инвертора и нагрузки, подключенной к инвертору, соответствуют проектным данным одной из реальных электроустановок. Емкость аккумуляторной батареи рассчитана на поддержку автономной работы СРЭ в течение 24 часов.

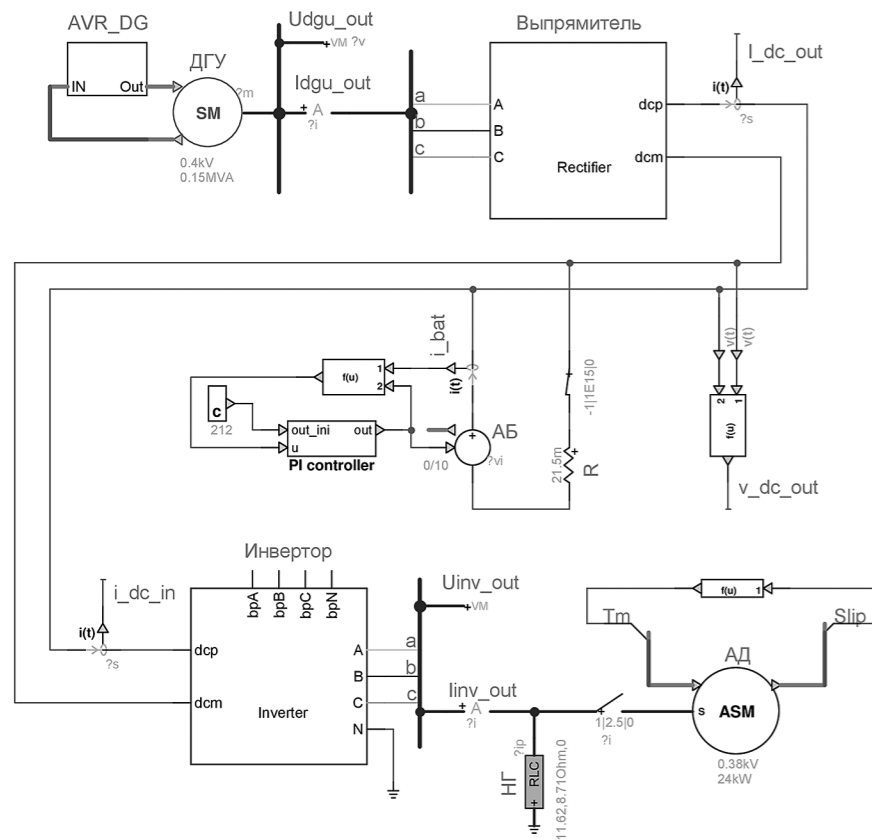
Модели выпрямителя и инвертора состоят из двух частей: силовой и блоков управления. Силовая часть модели выпрямителя содержит преобразовательный трансформатор со схемой соединений обмоток «Y/Δ», тиристорный мост и фильтр сглаживания пульсаций выходного напряжения, состоящий из дросселя и конденсатора.

Выпрямитель работает по шестипульсной схеме. Основное влияние на работу выпрямителя, при переходных процессах, оказывают регуляторы, включенные в модель блоков управления. Регулирование напряжения на выходе выпрямителя осуществляется пропорционально-интегральным регулятором, который обеспечивает ограничение выходного тока выпрямителя в соответствии с заданными пределами его изменения. При отклонении напряжения на входе выпрямителя за пределы допустимых значений, предусмотрено снятие импульсов управления тиристорами и отключение выпрямителя.

В совокупности, регулятор по напряжению, ограничитель выходного тока и логика отключения выпрямителя определяют поведение выпрямителя при возмущениях, как со стороны источника переменного тока, так и со стороны нагрузки постоянного тока.

К силовой части инвертора относится сглаживающий конденсатор на его входе, IGBT-мост, дроссель, трансформатор, конденсаторы на выходе, и тиристорный статический ключ, осуществляющий переключение на резервный источник – «байпас».

РИС. 2. Структурная схема модели СРЭ, реализованной в программном комплексе EMTP-RV



Принцип действия инвертора базируется на широтно-импульсной модуляции (ШИМ) коммутаций биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Работой IGBT моста управляет модуль с базовой частотой модуляции 2,1 кГц. Задающий сигнал, для ШИМ IGBT-моста, формируется пропорционально-интегральным регулятором, контролирующим напряжение на выходе инвертора, и системой ограничения мгновенных значений тока на выходе инвертора. При отклонении параметров входного напряжения за допустимые пределы, а также при отказе силовой части инвертора происходит переключение нагрузки на резервный источник без перерыва питания с помощью тиристорного статического переключателя.

Модель ДГУ включает в себя, кроме уравнений синхронного генератора, уравнения дизеля с регулятором топливоподачи, уравнения системы и регулятора возбуждения. Модель аккумуляторной батареи учитывает ЭДС поляризации и позволяет задавать степень заряженности

аккумуляторов и учитывать степень их износа.

На модели были проведены расчеты переходного процесса в СРЭ при пуске асинхронного двигателя электропривода задвижек технологического трубопровода. Двигатель подключен к выходной сборке 0,4 кВ инвертора. В расчете были приняты следующие параметры компонентов СРЭ:

Генератор:

$$P_{ном} = 0,12 \text{ МВт}; U_{ном} = 0,4 \text{ кВ};$$

$$\cos\varphi_{ном} = 0,8; I_{фх} = 27 \text{ А};$$

$$X_d'' = 0,16 \text{ о.е.}; X_d' = 0,17 \text{ о.е.};$$

$$X_d = 2,02 \text{ о.е.}; X_0 = 0,08 \text{ о.е.};$$

$$T_d''^{(3)} = 0,011 \text{ с}; T_d'^{(3)} = 0,035 \text{ с}.$$

Зарядное устройство:

$$U_{вх.ном} = 400 \text{ В}; U_{вых.} = 236,4 \text{ В};$$

$$I_{ном} = 630 \text{ А}.$$

Аккумуляторная батарея:

$$C_{10} = 1000 \text{ А}\cdot\text{ч}; R_{АБ} = 21,5 \text{ мОм};$$

количество аккумуляторов – 106 шт.

Инвертор:

$$U_{вых.ном} = 400 \text{ В}; U_{вх.ном} = 220 \text{ В};$$

$$S_{ном} = 100 \text{ кВА}; I_{lim} = 4 I_{ном}$$

(уставка токоограничения).

Асинхронный двигатель:

$$P_{ном} = 24 \text{ кВт}; U_{ном} = 380 \text{ В};$$

$$\cos\varphi_{ном} = 0,91; \cos\varphi_{п} = 0,3;$$

$$I_{п}/I_{ном} = 7,0; M_{п}/M_{ном} = 1,4;$$

$$M_{макс}/M_{ном} = 2,5; \eta_{ном} = 89 \%;$$

$$s_{ном} = 1,9 \%; J = 0,255 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{рад};$$

момент сопротивления механизма – постоянный; коэффициент загрузки – 0,8.

Статическая нагрузка:

$$S_{ном} = 10 \text{ кВА}; U_{ном} = 380 \text{ В};$$

$$\cos\varphi_{ном} = 0,8.$$

Результаты расчета переходных процессов представлены на рис. 3 в виде приведенных к 20 мс среднеквадратичных и средних значений напряжений и токов. Переменные напряжения и токи представлены среднеквадратичными значениями, постоянные напряжения и токи представлены средними значениями. Пульсации токов и напряжений не отображены, но в первичных результатах расчета они имеются.

В предшествующем пуску двигателя режиме работы фазное напряжение на шинах ДГУ составляло 233 В, фазный ток на входе выпрямителя – 84,2 А. Выпрямитель обеспечивал поддерживающий заряд аккумуляторной батареи при напряжении 236,2 В и питание статической нагрузки током, составляющим на входе инвертора 52,1 А. Фазное напряжение на выходе инвертора составляло 231 В, ток на выходе инвертора, обусловленный статической нагрузкой – 15,9 А, что соответствует загрузке инвертора на 10,5% номинальной мощности.

В момент времени 10,0 с начался пуск асинхронного двигателя, подключенного к инвертору. Наибольший выходной ток инвертора, включающий пусковой ток двигателя и ток статической нагрузки, составил 298 А, при номинальном токе инвертора 152 А, см. рис. 3. Пуск двигателя вызвал провал напряжения на выходе инвертора до 151,8 В, что составляет 69% номинального напряжения, продолжительность провала – 34 мс, затем напряжение восстановилось до номинального. За 1,1 с двигатель развернулся до номинального скольжения, а в момент времени 11,5 с был отключен. Такой режим работы двигателя имитирует управление группой технологических задвижек.

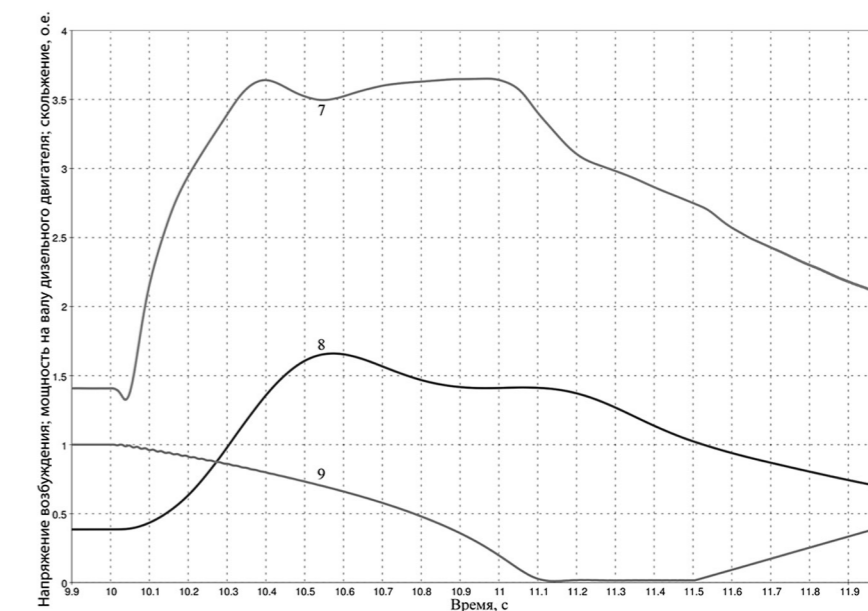
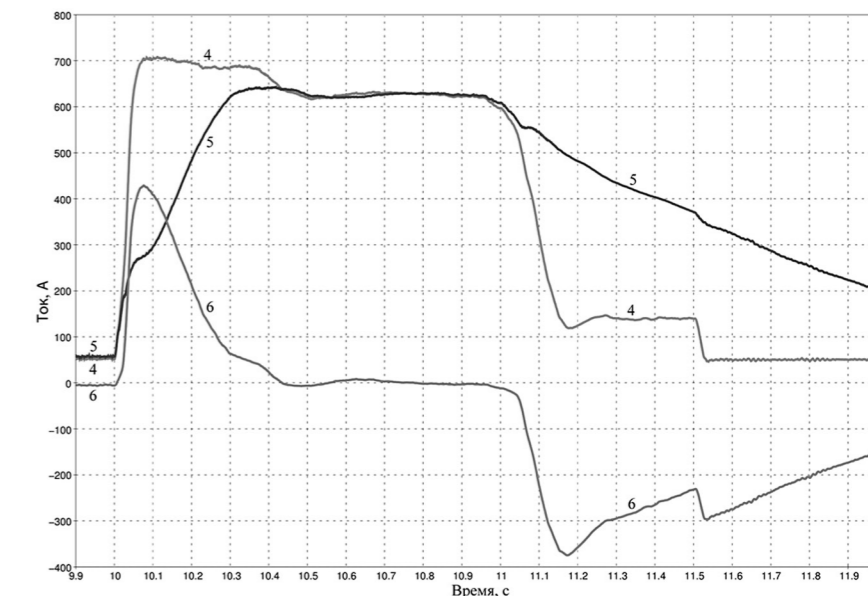
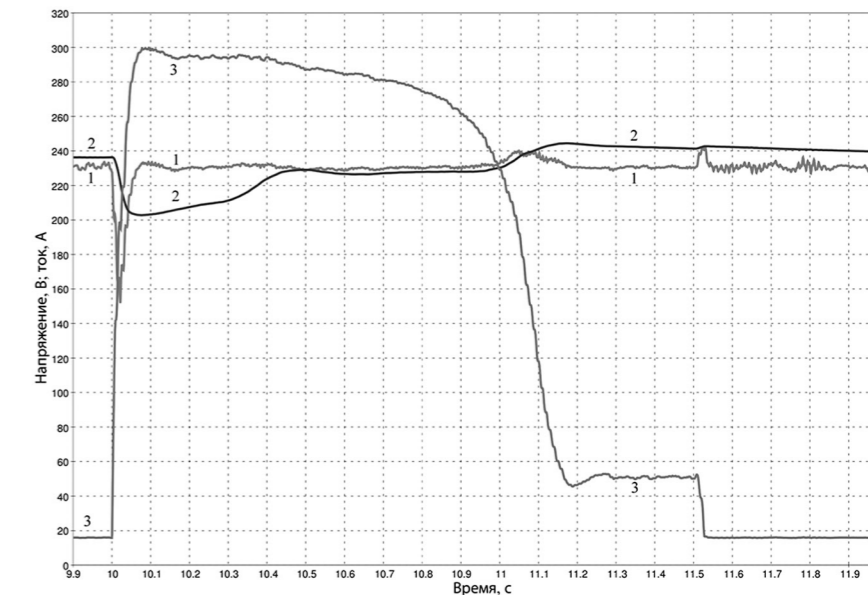
В соответствии с ГОСТ Р 51317.6.5 – 2006 [2] глубина провалов напряжения на клеммах электроприемников допускается в пределах 30% номинального напряжения при продолжительности не более 200 мс. Следовательно, пуск двигателя может вызывать сбои в работе электроприемников, входящих в состав статической нагрузки.

В Standard IEC 62040-3 Uninterruptible power systems (UPS) [1] определены требования к качеству переходных процессов, вызванных резким набросом или сбросом нагрузки в виде границ зоны допустимых значений провалов и выбросов напряжений от их продолжительности для трех классов установок бесперебойного питания. На рис. 4 приведена характеристика допустимых изменений напряжения для установок бесперебойного питания третьего класса.

Результаты моделирования показали, что моделируемая СРЭ удовлетворяет требованиям лишь, третьего класса, по Standard IEC 62040-3 Uninterruptible power systems (UPS) [1]. Требования по провалам напряжения, соответствующие второму и первому классу представляются чрезмерно высокими.

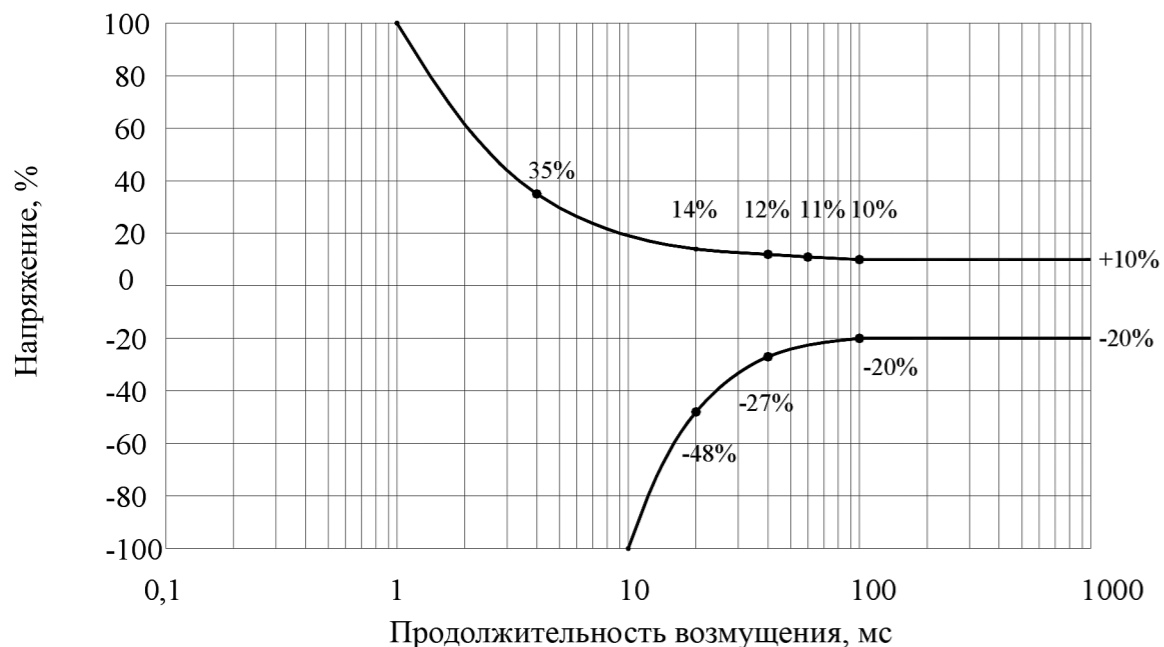
Пуск двигателя вызвал резкое увеличение тока во входной цепи инвертора до 708 А, см. рис. 3. Это привело к снижению выходного напряжения выпрямителя до 203 В, что соответствует 92% номинального напряжения. В начале пуска двигателя аккумуляторная батарея приняла на себя большую часть

РИС. 3. Результаты расчета пуска двигателя



- 1 – среднеквадратичное напряжение на выходе инвертора;
- 2 – среднее напряжение на входе инвертора;
- 3 – среднеквадратичный ток на выходе инвертора;
- 4 – средний ток на входе инвертора;
- 5 – средний ток на выходе выпрямителя;
- 6 – средний ток аккумуляторной батареи;
- 7 – среднее напряжение возбуждения генератора ДГУ;
- 8 – мощность на валу дизельного двигателя;
- 9 – скольжение ротора электродвигателя

РИС. 4. Допустимые значения провалов и выбросов напряжения для установок бесперебойного питания третьего класса [1]



возросшей нагрузки. Ток в цепи батареи через 75 мс после начала пуска составил 429 А, а в цепи выпрямителя в этот же момент времени 276 А. Под действием регуляторов выпрямителя напряжение на его выходе увеличивалось и через 0,375 с после начала пуска достигло 220 В. При этом по мере восстановления напряжения происходило перераспределение токов между выпрямителем и аккумуляторной батареей: ток выпрямителя нарастал до номинального, а ток АБ снижался. Параметры провала напряжения на сборке постоянного тока СРЭ определяются динамическими характеристиками выпрямителя и внутренним сопротивлением аккумуляторной батареи. Продолжительность провала напряжения на выходе выпрямителя значительно больше, чем на выходе инвертора, что обусловлено процессами перехода аккумуляторов из режима разряда в режим заряда и инерционностью регуляторов выпрямителя. Максимальная мощность, потребляемая инвертором при пуске двигателя, достигала 150 кВт. Это более чем в два раза превышает активную мощность нагрузки, что объясняется большим потреблением двигателем реактивной мощности при его пуске.

В соответствии с ГОСТ Р 51317.6.5 – 2006 [2] допустимая глубина провалов напряжения на клеммах

технических средств систем оперативного постоянного тока электроустановок составляет 30% номинального напряжения, при продолжительности не превышающей 1 с и 60% номинального напряжения при продолжительности не превышающей 100 мс. Пуск двигателя не привел к провалу напряжения ниже 90% от номинального на выходе выпрямителя, таким образом, пуск двигателя не приводит к сбоям в работе электроприемников постоянного тока.

Ток дизель-генератора увеличился с 84,2 А, при работе на статическую нагрузку, до 352 А во время пуска двигателя. При этом возник провал напряжения до 187 В, что составляет 85% от номинального. Продолжительность провала – 0,65 с. Ввиду малой глубины провала напряжения, пуск двигателя не вызывает сбоев в работе электроприемников, подключенных к шинам ДГУ.

Выводы:

1. Результаты исследования переходных процессов в СРЭ показали, что для обеспечения соответствия требованиям по ЭМС, содержащимся в 2. ГОСТ Р 51317.6.5 [2], необходимо существенно завышать мощность установленного оборудования СРЭ.

2. Глубину и продолжительность провалов напряжения в СРЭ целесообразно нормировать на основе 3. Standard IEC 61000-4-11 Electromagnetic compatibility (EMC) [3], допускающего провалы глубиной 30% при продолжительности 1 с и 60% при продолжительности 0,5 с.
3. Исследования переходных процессов в СРЭ с выпрямителями и инверторами, использующими современную элементную базу силовых ключей и цифровые регуляторы следует продолжить для обновления действующих и разработки новых национальных и отраслевых стандартов. ●

Литература

1. Standard IEC 62040-3 Uninterruptible power systems (UPS) – Part 3: Method of specifying the performance and test requirements
2. ГОСТ Р 51317.6.5 – 2006 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний
3. Standard IEC 61000-4-11 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-11: Testing and measurement techniques. Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests.

Ключевые слова: энергоснабжение, газодобыча, резервные источники, дизельгенераторы, газопоршневые установки.