

# О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ И УСТАВОК ЗАЩИТ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

АВТОРЫ:

П.В. ИЛЮШИН,  
К.Т.Н.,  
ФГАОУ ДПО  
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ»

Ю.Е. ГУРЕВИЧ,  
К.Т.Н.,  
ФГБОУ ВО  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»  
(НИЖНИЙ НОВГОРОД)

А.Л. КУЛИКОВ,  
Д.Т.Н.,  
ФГБОУ ВО  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»  
(Г. НИЖНИЙ НОВГОРОД)

**С**амая крупная из аварий на мировых электросетях за последние 60 лет произошла 9 ноября 1965 г. в Нью-Йорке. Более 25 млн жителей региона в течение полусуток оставались без централизованного энергоснабжения. Столь масштабное отключение было вызвано аварией на одной из воздушных линий

электропередачи, входящей в состав Ниагарского энергетического узла. В результате отключения одной линии пять оставшихся ЛЭП были моментально перегружены и в течение четырех секунд вышли из строя. Оставшиеся «островки» еще функционирующих сетей региона прекратили свою работу в течение последующих 15 мин.

**Ключевые слова:** распределенная генерация; генератор; система возбуждения; автоматический регулятор напряжения; релейная защита; надежность электроснабжения.



## ВВЕДЕНИЕ

Анализ статистических данных по нарушениям электроснабжения промышленных потребителей в энергорайонах с объектами распределенной генерации (РГ) позволяет сделать вывод, что важную роль в обеспечении надежности электроснабжения имеет правильный учет параметров систем возбуждения (СВ) и уставок устройств релейной защиты (РЗ) генераторов.

В промышленных энергорайонах с объектами РГ регулярно фиксируются случаи, когда при кратковременном провале напряжения в результате короткого замыкания (КЗ) связь энергорайона с энергосистемой нарушается. Наиболее тяжелые режимы возникают в ремонтной схеме сети внешнего электроснабжения, когда питание энергорайона осуществляется по одной линии электропередачи. При этом генераторы объектов РГ либо не могут обеспечить надежное электроснабжение нагрузки энергорайона, что приводит к ее отключению, либо сами отключаются устройствами РЗ, действующими при снижении напряжения [1–3].

Первой причиной является некорректный выбор типа СВ на этапе проектирования системы электроснабжения энергорайона. Вторая причина заключается в том, что провал напряжения оказывается глубже или длительнее, чем допускают устройства РЗ генераторов. Последствия для промышленных потребителей могут быть существенными, если нарушается электроснабжение систем жизнеобеспечения и/или непрерывных технологических процессов.

Известно несколько типов СВ, различающихся как принципиальными особенностями, которые следует учитывать при интеграции объектов РГ в сети энергорайонов, так и мелкими нюансами, мало влияющими

на функционирование генераторов. В различных схемно-режимных условиях с разным составом электроприемников потребителей одни свойства СВ не оказывают существенного влияния, а другие играют решающую роль.

Генераторы зарубежных заводов-изготовителей оснащаются СВ, которые спроектированы по требованиям национальных или общеевропейских стандартов. При этом алгоритмы работы и параметры настройки СВ обеспечивают качество напряжения в энергорайонах, устойчивость генераторов при внешних возмущениях, а также определяют характер протекания переходных процессов и параметры аномальных и аварийных режимов [4, 5].

В статье рассмотрены особенности СВ генераторов, широко используемых на объектах РГ, а также подходы к выбору уставок устройств РЗ с позиции потребителей электрической энергии, предъявляющих требования по надежности и качеству внешнего электроснабжения.

## ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

Рассмотрим широко применяемые типы СВ генераторов объектов РГ, которые перечислены в порядке возрастания показателей надежности электроснабжения потребителей, а также проведем анализ их особенностей.

1. СВ SHUNT используется на генераторах мощностью до 150 кВА, в отдельных случаях до 500 кВА, и предназначена для управления только установившимися режимами работы генераторов, непрерывное регулирование напряжения не предусмотрено.

Так как питание СВ SHUNT осуществляется от шин генератора, то в установившихся режимах, допустимых по напряжению, мощности и току, СВ может обеспечиваться поддержание (на заданных значениях) тока возбуждения или напряжения генератора (реактивной мощности, коэффициента мощности). Подобное управление эффективно при оптимизации режимов энергорайона, например, по критерию минимизации потерь, с учетом других имеющихся в энергорайоне средств регулирования параметров режима.

Уязвимость СВ SHUNT проявляется при возникновении провала напряжения на шинах генератора (КЗ в сети внешнего или внутреннего электроснабжения, несинхронное автоматическое повторное включение и др.). При отсутствии регулирования напряжения ток возбуждения генератора уменьшается пропорционально снижению напряжения на его шинах, что не позволяет стабилизировать параметры режима. Допустимость применения генераторов с СВ SHUNT должна быть обоснована результатами расчетов режимов в конкретных схемно-режимных условиях.

2. СВ PMG (Permanent Magnet Generator) отличается от SHUNT наличием собственного источника питания — вращающегося возбуждителя с независимым подвозбуждением от постоянных магнитов (ток возбуждения не зависит от напряжения на шинах генераторного напряжения), что снижает вероятность возникновения негативных последствий при провалах напряжения на шинах генераторов.

На рис. 1 приведены результаты расчетов переходных процессов при трехфазном КЗ ( $t_{кз} = 0,18$  с) в сети внешнего электроснабжения энергорайона с объектом РГ, имеющим слабые связи с энергосистемой, для случаев, когда генераторы

оснащены СВ SHUNT и СВ PMG. В результате КЗ напряжение снижается ниже уставки устройства РЗ генераторов ( $U \leq 0,8U_{ном}$ ) на время больше 1,2 с для СВ SHUNT (см. рис. 1а) и больше 0,8 с для СВ PMG (см. рис. 1б) по причине самозапуска электродвигателей [6].

Если уставка устройств РЗ генераторов по напряжению равна примерно 1 с, то генераторы с СВ SHUNT будут отключены, а с СВ PMG останутся в работе.

3. СВ AREP (патент Leroy-Somer) дает результаты расчетов переходных процессов близкие к СВ PMG и в некоторой мере повышает устойчивость нагрузки, увеличивая ток возбуждения при росте тока статора (введено компаундирование по току статора).

4. Аналоговый или цифровой автоматический регулятор напряжения, которым оснащаются СВ генераторов по требованию заказчика, применяется на генераторах малой мощности, где возможны различия в выборе параметров, исполь-

зуемых в законе регулирования, а также в его быстродействии. Важными факторами в этом случае являются потолочное значение тока возбуждения и скорость его нарастания, что влияет на скорость стабилизации параметров режима после ликвидации возмущения.

5. Специализированный автоматический регулятор напряжения с дополнительными функциями для улучшения параметров переходных процессов при набросах и сбросах нагрузки.

В данном случае возможно применение следующих вариантов регулирования:

- характеристика  $U/f$  обеспечивает практически мгновенное нарастание напряжения генератора при провалах напряжения на шинах;
- функция Load Agreement Module обеспечивает более сложный закон регулирования с его адаптивной настройкой при набросах нагрузки на генератор свыше 60% от  $P_{ном}$ .

Указанные виды регулирования наиболее востребованы в генераторах при их функционировании в изолированных энергосистемах (энергорайонах), а также в случае выделения энергорайона в островной режим в результате коммутаций в сети. Исследование данных видов регулирования показало, что:

- снижение напряжения генератора с приводом от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с функцией Load Agreement Module является эффективной мерой, позволяющей уменьшить динамические снижения частоты при набросах нагрузки на генератор, при условии, что величина активной нагрузки существенно зависит от напряжения;
- снижение напряжения может не давать положительного эффекта, если величина нагрузки мало зависит от напряжения, а это характерно для узлов нагрузки, в которых большую часть активной мощности потребляют электродвигатели;

- если переключение питания нагрузки выполняется с бестоковой паузой, как в случае срабатывания устройства автоматического ввода резервного питания (АВР), то условия самозапусков и пусков асинхронных двигателей при снижении напряжения существенно ухудшаются;
- инициируемое функцией Load Agreement Module снижение напряжения на генераторе может быть недопустимым, если оно приводит к отключению электроприемников и провоцирует возникновение в энергорайоне лавины напряжения [7–9].

Следовательно, до заказа генераторов, в СВ которых реализована функция Load Agreement Module, необходимо провести предварительный анализ результатов расчетов переходных процессов для подтверждения допустимости ее наличия в конкретных схемно-режимных условиях.

Компания Leroy-Somer определяет основные области применения генераторов с СВ следующим образом: SHUNT — базовое резервное электроснабжение и телекоммуникации; PMG, AREP — море, строительство, госпитали, банки, производство электроэнергии. Отметим, что электроснабжение энергорайонов с промышленной нагрузкой, имеющей в своем составе большое количество электродвигателей, в перечень основных областей применения генераторов с указанными СВ не входит [10].

Системы возбуждения PMG и AREP, кроме того, допускают повышение тока статора до трехкратного (по отношению к  $I_{ном}$ ) в течение 10 с, что обусловлено не форсировкой возбуждения, а появлением свободных составляющих в токе КЗ.

Таким образом, СВ SHUNT, PMG и AREP имеют одну и ту же область эффективного применения: установившиеся режимы без перегрузок при стабильном напряжении на шинах. Кратковременные снижения напряжения при возникновении внешних возмущений будут приводить к отказам генераторов в случае применения СВ SHUNT с наибольшей вероятностью и с наименьшей — при оснащении СВ AREP.

Результаты расчетов переходных процессов показывают, что обеспечить надежное электроснабжение промышленных потребителей от генераторов с СВ типа SHUNT, PMG и AREP в большинстве схемно-режимных ситуаций при возникновении нормативных и особенно сверхнормативных возмущений не представляется возможным.

Системы возбуждения, оснащенные аналоговым или цифровым, а также специализированным автоматическим регулятором напряжения с дополнительными функциями, предусматривают реализацию алгоритмов регулирования как в установившихся режимах, так и в переходных процессах.

## ПАРАМЕТРИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РЗ ГЕНЕРАТОРОВ

Заводы-изготовители для защиты генераторов от резких колебаний параметров режима задают такие уставки устройств РЗ, которые приводят к значительному сужению области допустимых режимов, препятствуя их нормальной работе. Причины отключений генераторов связаны с тенденциями к повышению их экономичности и эффективности, с учетом того, что время ликвидации аварийных возмущений

снижается, а скорость восстановления параметров послеаварийного режима возрастает. Уставки устройств РЗ генераторов при этом часто невозможно согласовать с уставками защит электросетевых элементов, что приводит к их излишним отключениям [11–13].

Неселективные отключения генераторов объектов РГ приводят к нарушению электроснабжения потребителей, набросам нагрузки на электросетевое оборудование в прилегающей сети, вызывая его перегрузки. Принципиально то, что уставки устройств РЗ генераторов не подлежат изменению без согласования с заводом-изготовителем в течение всего гарантийного срока, а в случае их самовольного изменения гарантийные обязательства снимаются в одностороннем порядке.

Рассмотрим пример газопоршневой электростанции (ГПЭС), состоящей из четырех генераторов мощностью по 2,4 МВт, уставки защит которых действуют на их отключение, если в течение 0,2 с во всех трех фазах напряжения выше 110% или ниже 90% от  $U_{ном}$ . Характер протекания переходного процесса существенно зависит от состава нагрузки и результирующей устойчивости электродвигателей переменного тока. Пример переходного процесса при выделении ГПЭС в островной режим с промышленной нагрузкой (дефицит активной мощности 15%) приводит к отключению всех генераторов и нарушению электроснабжения нагрузки. На рис. 2 показан переходный процесс (устройства РЗ выведены из работы), который заканчивается удовлетворительно, однако в реальной ситуации устройства РЗ отключат генераторы.

Уставки устройств РЗ генераторов по снижению напряжения без контроля токов абсолютно не обоснованы, так как опасность термического

## ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КЗ: А) ГЕНЕРАТОРЫ С СВ SHUNT; Б) ГЕНЕРАТОРЫ С СВ PMG

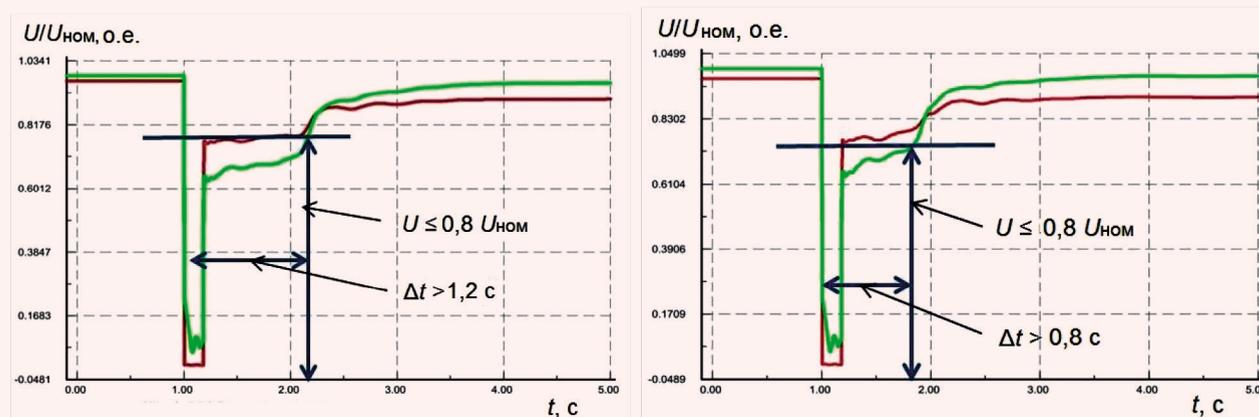


Рис. 1

повреждения обмоток наступает только в тех случаях, когда кратность и/или длительность аварийных перегрузок по току статора или ротора превышают допустимые значения.

Величины токов определяются заводами-изготовителями с учетом конструктивных особенностей генераторов: класса нагревостойкости (температурный индекс) изоляции обмоток с корреляцией по значениям температуры; типа системы охлаждения и используемой охлаждающей среды обмоток статора и ротора.

В случае превышения данных значений по величине и длительности тока статора устройства РЗ действуют на отключение генератора от внешней сети, а тока ротора — на снижение тока возбуждения (расфорсировка возбуждения) до величины, исключающей опасный перегрев обмотки ротора.

Кроме того, при выборе уставок устройств РЗ генераторов следует учитывать, что фактическая длительность провала напряжения примерно в 2 раза больше, особенно при трехфазном КЗ, так как до восстановления номинальных скоростей вращения ток затормозившихся в процессе КЗ электродвигателей существенно выше номинального. Пример переходного процесса с увеличением длительности провала напряжения после ликвидации КЗ из-за самозапусков электродвигателей в узлах нагрузки приведен на рис. 3.

Важно то, что на отключение генераторов действуют устройства РЗ с уставками по отклонениям частоты ( $f < f_{\min}$  и  $f > f_{\max}$ ), которые учитывают:

- механические ограничения на превышение скорости (механическая прочность);

- недопущение приближений к резонансным частотам, при которых резко увеличивается амплитуда вибраций;
- недопущение снижений скорости (частоты) вращения с целью предотвращения отказов или неправильной работы вспомогательного оборудования, обеспечивающего нормальное функционирование привода генерирующей установки, например, нарушение процесса самовоспламенения рабочей смеси в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания.

Возмущения в виде больших скачкообразных набросов/сбросов нагрузки, происходящие без КЗ, также могут приводить к отключению генераторов в островном режиме работы, что возможно при включении/отключении мощных электроприемников или их групп. Заводы-изготовители генераторов в технической документации указывают допустимые величины набросов нагрузки в зависимости от исходной нагрузки генератора, которые не приводят к их отключению устройствами РЗ или технологическими защитами.

В этом случае обосновано применение технологической автоматики, обеспечивающей последовательные пуски небольших групп двигателей с контролем напряжения с учетом особенностей технологических процессов промышленных производств, или устройств плавного пуска (частотно-регулируемого привода) на наиболее мощных электродвигателях.

Если шины генераторного напряжения (непосредственно или через силовой трансформатор) связаны с разветвленной сетью среднего напряжения 6–35 кВ, в которой применяются максимальные токовые защиты с селектив-

ностью по времени, то вероятность излишних отключений генераторов существенно возрастает [14].

Следовательно, на этапе проектирования энергорайонов с объектами РГ необходимо проводить глубокий анализ результатов расчетов переходных процессов для оценки допустимости применения конкретных типов генераторов (параметров СВ, уставок устройств РЗ) с целью обеспечения надежного электроснабжения потребителей от объектов РГ.

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТОВ РЕЖИМОВ В СЕТЯХ С РГ

Данный анализ следует проводить в нормальных и аномальных режимах. Если нарушения нормальной работы генераторов могут приводить к ущербу у потребителей, то для формирования перечня эффективных противоаварийных мероприятий необходимо выполнение расчетов для всех возможных опасных режимов.

При выполнении таких расчетов следует учитывать две особенности используемых программных комплексов (ПК):

- 1) в ряде ПК используется упрощенное описание систем регулирования текущей мощности, развиваемой паротурбинным приводом генератора, что без специальной адаптации непригодно для моделирования газотурбинных двигателей и двигателей внутреннего сгорания (например, газопоршневых);
- 2) основная область применения ПК — расчеты в системообразующих сетях, где переходные

процессы мало зависят от корректности используемых моделей нагрузки, однако в энергорайонах с объектами РГ это принципиально.

При формировании расчетной модели и последующем выполнении расчетов режимов особое внимание следует уделять:

- точности параметров схемы замещения сети и электростанций (объектов РГ) в рассматриваемом энергорайоне, а также на ближайших к энергорайону участках энергосистемы;
- параметрам настройки устройств РЗ (точности информации о предельных длительностях КЗ) в сети внешнего и внутреннего электроснабжения энергорайона;
- особенностям технологических процессов на промышленных предприятиях;
- параметрам электродвигателей переменного тока (состав параметров зависит от особенностей применяемого ПК для расчетов режимов);
- индивидуальному или обобщенному введению в расчетную модель основных электродвигателей нагрузки (зависит от класса напряжения и установленной мощности электродвигателей);
- статистическим данным по однофазным и многофазным КЗ различной длительности (являются вспомогательными, но позволяют судить о вероятностях возникновения возмущений и вызываемых ими нарушений);
- сведениям, необходимым для проверки согласованности действий технологической автоматики, управляющей основными технологическими

процессами, с действием защит генераторов для предотвращения их излишних отключений и минимизации ущербов от нарушений электроснабжения [15–17].

Основная сложность выполнения расчетов переходных процессов в энергорайонах с объектами РГ заключается в многообразии вариантов, которые подлежат рассмотрению:

- исходная схема энергорайона и ее ремонтные разновидности (наибольшее влияние оказывает наличие и количество связей энергорайона с энергосистемой);
- объем располагаемой генерации в энергорайоне с учетом текущей схемы сети внутреннего электроснабжения энергорайона;

особенности генераторов на объектах РГ (параметры СВ, уставки и выдержки времени устройств РЗ, законы регулирования мощности приводов генераторов — принципы регулирования и запаздывания при наборе мощности);

- величины нагрузок и вариации их состава (от максимума до минимума), если эти вариации существенны, с учетом их различного размещения в сети внутреннего электроснабжения энергорайона;
- места приложения нормативных и сверхнормативных возмущений, с учетом статистических данных;
- особенности срабатывания устройств РЗ в сети энергорайона

## ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ГПЭС В ОСТРОВНОЙ РЕЖИМ С НАГРУЗКОЙ (УСТАВКИ УСТРОЙСТВ РЗ ПО СНИЖЕНИЮ $U$ И ОТКЛОНЕНИЮ $f$ — СИНИЕ ТОЧКИ)

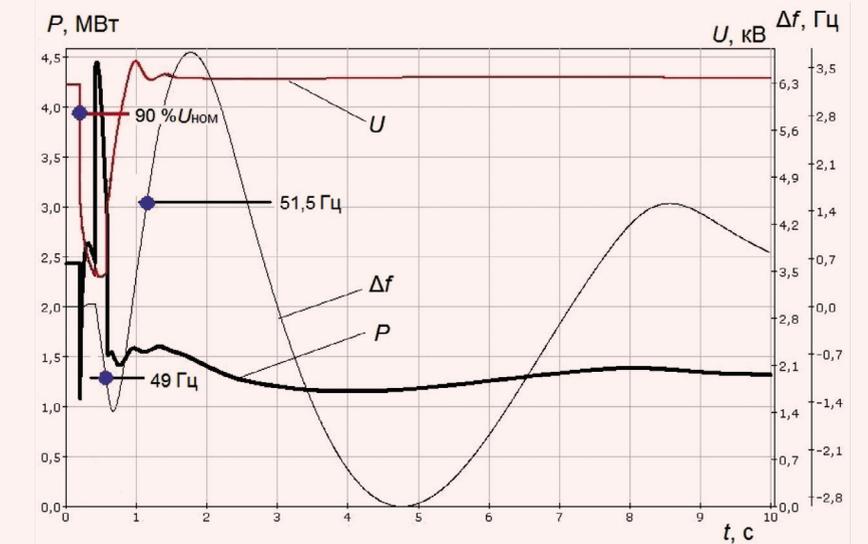


Рис. 2

при предельных длительностях многофазных КЗ;

- другие особенности энергорайона, которые в том числе могут возникнуть в перспективной схеме [18].

Если рассчитанные переходные процессы заканчиваются неуспешно: часть электрооборудования отключается и остается отключенной, часть электродвигателей опрокидывается и отключается устройствами РЗ и др., то следует предусматривать реализацию эффективных противоаварийных мероприятий (ПАМ) с учетом их экономической целесообразности:

- установку устройств противоаварийной автоматики, алгоритмы работы и параметры настройки которых необходимо согласовывать с уставками технологических защит;

- увеличение установленной мощности генераторов на объектах РГ;

- установку накопителей электрической энергии и др.

При выборе ПАМ следует помнить, что обычно рассчитывается не весь переходный процесс (от начального возмущения до возврата к нормальному режиму), а только его начальная часть, позволяющая выявить электрооборудование, нормальная работа которого может быть нарушена, что и определяет характеристики аномального режима [19, 20].

Расчетная схема большого энергорайона должна включать не все электрооборудование, а только то, параметры которого могут оказывать существенное влияние

на результаты расчетов. Поэтому, приступая к расчетам режимов, необходимо стремиться к:

- уменьшению их объема за счет исключения простых случаев, когда достаточно понимания характера переходного процесса (например, срабатывание устройств РЗ генераторов при снижении напряжения в результате близких КЗ);

- сокращению числа логических и расчетных вариантов, предварительно группируя виды расчетов по классам (например, по видам нормативных и сверхнормативных возмущений) таким образом, чтобы можно было проводить анализ результатов и делать выводы об эффективности ПАМ.

Рассмотрим пример группировки расчетных задач по начальным возмущениям для энергорайона с объектом РГ.

1. Нормальный пуск крупного электродвигателя (для формирования перечня ПАМ особенно важно анализировать их прямые пуски, оказывающие существенное влияние на режим работы сети).
2. Переключение питания групп электродвигателей с бестоковой паузой, если такие переключения могут иметь место по технологическим или электрическим факторам, но не связанным с КЗ в сети энергорайона.
3. Режимы КЗ в сети с соответствующими бестоковыми паузами при действиях устройств АВР, автоматического повторного включения (АПВ) и др. с определением возможности и допустимости самозапуска электродвигателей (или автоматического повторного

пуска ступенями с контролем напряжения).

Следует учитывать КЗ как в сети энергорайона, так и во всех связанных с ним сетях, особенно более низких классов напряжения, где применяются в качестве основных или резервных максимальные токовые защиты с селективностью по времени (большие длительности КЗ).

В большинстве случаев требуется задание двух начальных параметров возмущения: глубины провала напряжения, измеренного на шинах генераторов в начале КЗ ( $U_0$ ), и длительности КЗ. Напряжение  $U_0$  — параметр, легко вычисляемый и удобный для сравнения тяжести КЗ в разных схемно-режимных условиях. Однако его недостаточно для выводов о срабатываниях (несрабатываниях) устройств РЗ генераторов по напряжению, так как пока КЗ не ликвидировано, напряжение дополнительно понижается из-за роста токов тормозящихся электродвигателей. Следовательно, необходимо контролировать весь переходный процесс  $U(t)$ .

На рис. 4 приведены результаты расчетов для энергорайона с объектом РГ, работающего в островном режиме. Определялись условия, при которых, во-первых, осуществим самозапуск всех электродвигателей, и, во-вторых, генераторы не отключаются действием устройств РЗ по снижению частоты (уставка по частоте 47,5 Гц, выдержка времени 2 с).

В дополнительных сериях расчетов (например, при снижении напряжения) следует определять допустимость влияния на технологический процесс отключений неответственных электродвигателей, обеспечивающих успешный самозапуск наиболее ответственных.

## ИНФОРМАЦИЯ

Современные схемы возбуждения, кроме возбудителя, содержат большое количество вспомогательного оборудования. Совокупность возбудителя, вспомогательных и регулирующих устройств принято называть системой возбуждения.

Системы возбуждения должны быть надежными и экономичными, допускать регулирование тока возбуждения в необходимых пределах, быть достаточно быстродействующими, а также обеспечивать потолочное возбуждение при возникновении аварии в сети.

Регулируя ток возбуждения, такие системы изменяют напряжение синхронного генератора и отдаваемую им в сеть реактивную мощность. Регулирование возбуждения генератора позволяет повысить устойчивость параллельной работы.

Уставки устройств РЗ, заданные заводскими изготовителями генераторов, часто не обоснованы, что препятствует их нормальной работе, не позволяет согласовать с уставками устройств РЗ электросетевых элементов, а также приводит к их излишним отключениям.

Расчеты переходных процессов в энергорайонах с объектами РГ имеют существенные особенности, в отличие от аналогичных расчетов в системообразующих сетях, которые необходимо учитывать при проектировании.

Если анализ результатов расчетов режимов показывает, что нарушения нормальной работы генераторов приводят к нарушениям электроснабжения ответственных электроприемников потребителей, то на этапе проектирования энергорайона необходимо предусматривать реализацию эффективных противоаварийных мероприятий.

Для обеспечения надежного электроснабжения потребителей от объектов РГ, особенно в островном режиме, необходимо при проектировании обеспечить правильный выбор систем возбуждения и уставок устройств РЗ генераторов.

## ВЫВОДЫ

В промышленных энергорайонах с объектами РГ регулярно фиксируются случаи, когда при кратковременных провалах напряжения в результате КЗ нарушается электроснабжение ответственных электроприемников, что приводит к аварийному останову технологических процессов с соответствующими ущербами.

На объектах РГ находят широкое применение генераторы с системами возбуждения, которые предназначены для управления только установившимися режимами без перегрузок при стабильном напряжении на шинах, а непрерывное регулирование напряжения в них не предусмотрено.

## ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КЗ С УЧЕТОМ САМОЗАПУСКОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

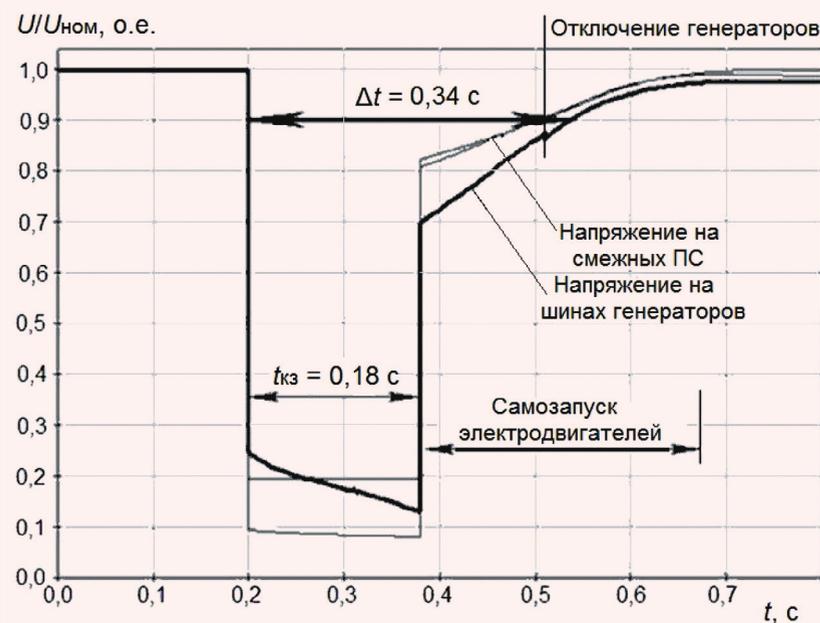


Рис. 3

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воропай Н. И., Осака А. Б. Будущие электроэнергетические системы — тенденции и проблемы // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 4. С. 2–4.
2. Папков Б. В., Осокин В. Л. Теоретические основы надежности и эффективности электроснабжения: Учеб. пособие. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2019.
3. Илюшин П. В. Анализ обоснованности уставок устройств РЗА генерирующих установок с двигателями внутреннего сгорания на объектах распределенной генерации // Релейная защита и автоматизация. 2015. № 3. С. 24–29.

4. Гуревич Ю. Е., Кабиков К. В. Особенности электро-снабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2005.
5. Илюшин П. В., Куликов А. Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией: монография. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019.
6. Илюшин П. В., Симонов А. В. О функционировании распределенных источников энергии с силовыми преобразователями в составе энергосистем и изолированных энергорайонов//Релейная защита и автоматизация. 2020. № 2. С. 30–38.
7. Илюшин П. В., Гуревич Ю. Е. О специальном воздействии на систему возбуждения авто-
- номно работающих генераторов при больших набросах нагрузки//Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2016. № 2. С. 2–7.
8. Илюшин П. В. Особенности реализации многопараметрической делительной автоматики в энергорайонах с объектами распределенной генерации//Релейная защита и автоматизация. 2018. № 2 (31). С. 12–24.
9. Илюшин П. В. О влиянии распределенной генерации на работу устройств автоматического включения резервного питания//Релейная защита и автоматизация. 2017. № 4 (29). С. 28–36.
10. Leroy-Somer: Системы возбуждения синхронных генераторов LSA [Электронный ресурс].

## ДОПУСТИМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГЛУБИНЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРОВАЛА НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КЗ

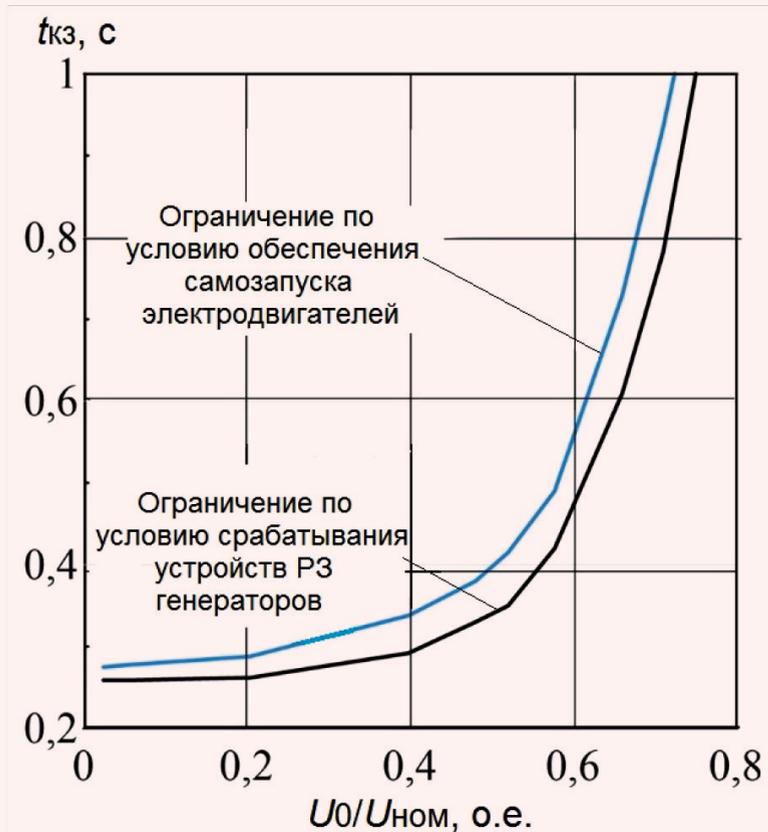


Рис. 4

- URL: [http://xn--7sboc0ajnnfgt.xn--p1ai/publ/generacija\\_ehlektroehnergii/tekhnologiii/leroy\\_somer\\_sistemy\\_vozbuzhdenija\\_sinkhronnykh\\_generatorov\\_lsa/4-1-0-1](http://xn--7sboc0ajnnfgt.xn--p1ai/publ/generacija_ehlektroehnergii/tekhnologiii/leroy_somer_sistemy_vozbuzhdenija_sinkhronnykh_generatorov_lsa/4-1-0-1) (дата обращения: 30.12.2019).
11. Илюшин П. В. Анализ особенностей выбора устройств РЗА в распределительных сетях с собственными генерирующими объектами небольшой мощности//Электрические станции. 2017. № 9. С. 29–34.
  12. Илюшин П. В., Королев Я. М., Симонов А. В. Комплексный подход к моделированию устройств РЗ и ПА, расчету уставок и анализу правильности их работы//Релейная защита и автоматизация. 2017. № 3. С. 13–19.
  13. Илюшин П. В. Анализ влияния распределенной генерации на алгоритмы работы и параметры настройки устройств автоматики энергосистем//Энергетик. 2018. № 7. С. 21–26.
  14. Куликов А. Л., Шарыгин М. В., Илюшин П. В. Принципы организации релейной защиты в микросетях с объектами распределенного генерирования электроэнергии//Электрические станции. 2019. № 7 (1056). С. 50–56.
  15. Илюшин П. В. Разработка схем выдачи мощности объектов распределительной генерации с учетом особенностей современных генерирующих установок//Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 2 (53). С. 28–35.
  16. Куликов А. Л. Анализ и оценка последствий отключения потребителей электроэнергии: коллективная монография/А. Л. Куликов, Б. В. Папков, М. В. Шарыгин. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2014.
  17. Непомнящий В. А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
  18. Илюшин П. В. Особенности учета параметров нагрузки при анализе переходных процессов в сетях с объектами распределенной генерации//Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 6 (51). С. 54–60.
  19. Илюшин П. В., Суханов О. А. Структура систем противоаварийного управления распределительными сетями крупных городов//Электротехника. 2014. № 3. С. 14–19.
  20. Илюшин П. В. Требования к разгрузке при вынужденном отделении от сети электростанции с собственными нуждами и нагрузкой на напряжении 6–10 кВ//Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2011. № 6. С. 23–27.

ноябрь 2020



X  
Открытый  
шахматный турнир  
энергетиков  
памяти М. М. Ботвинника

2020

# ШАХМАТНЫЙ ТУРНИР ЭНЕРГЕТИКОВ

Приглашаем команды энергетиков поддержать нашу добрую традицию и принять участие в ежегодном открытом шахматном турнире!

Состоится личное и командное первенство по правилам ФИДЕ для быстрых шахмат.

НАБИРАЙТЕ ЧЕТЫРЕХ ИГРОКОВ  
И РЕГИСТРИРУЙТЕ КОМАНДУ  
НА САЙТЕ ТУРНИРА  
[WWW.TURNIR.NTC-POWER.RU](http://WWW.TURNIR.NTC-POWER.RU)

