



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

К вопросу о признаках потери устойчивости промышленных электротехнических систем с автономными генераторами

Егоров А. В., доктор техн. наук, Зверьков А. Ю., магистр

Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, Москва

Исследована устойчивость электротехнической системы (ЭТС) с асинхронной двигательной и статической нагрузками, питание которой обеспечивается от одного источника внешнего электроснабжения и автономным синхронным генератором. Проведены вычислительные эксперименты в программном комплексе SAD. По их результатам построена зависимость границы статической устойчивости от первоначального провала напряжения. Проанализировано влияние скорости снижения напряжения ЭТС на ее устойчивость. Выявлены признаки потери устойчивости.

Ключевые слова: устойчивость электротехнических систем, автономные генераторы, электростанции собственных нужд, потеря устойчивости электротехнических систем.

Электротехнические системы промышленных предприятий представляют собой комплексы, в состав которых, в частности, входят асинхронные и синхронные электроприводы, а также статическая нагрузка. В настоящее время существует тенденция роста доли ЭТС предприятий нефтяной и газовой промышленности, содержащих автономные генераторы. Прежде всего это связано с использованием для электроснабжения удаленных объектов электростанций собственных нужд, на которых в качестве автономных источников применяют синхронные генераторы с дизельным или газотурбинным приводом. Поэтому вопрос устойчивости ЭТС, содержащих синхронные машины, работающие в генераторном режиме, представляется актуальным.

Устойчивость ЭТС многомашинных комплексов в целом рассмотрена в [1, 2], где сформулированы определения этого понятия как для асинхронных систем, так и для систем смешанного состава, включающих синхронные машины. Основные результаты, полученные при анализе промышленных ЭТС, содержащих автономные генераторы (далее — ЭТСАГ) [1–4]:

установлен вид функции, описывающей границу динамической устойчивости ЭТСАГ;

описаны параметры, влияющие на границу динамической устойчивости ЭТСАГ с произвольным составом электродвигательной нагрузки;

выявлено, что вид границы устойчивости ЭТС, содержащих синхронные машины, не зависит ни от режима работы машин, ни от

характера моделей, используемых для их описания;

сделаны общие выводы о влиянии состава нагрузки на устойчивость промышленных ЭТС;

показано, что в ЭТСАГ, как и в системах, имеющих только централизованное электроснабжение, возможно существование устойчивых промежуточных режимов.

Таким образом, подготовлена теоретическая база для проведения дальнейших исследований с целью решения ряда практических задач. На данном этапе актуален поиск фактора (или группы факторов), позволяющего заблаговременно распознать режим, ведущий к потере устойчивости ЭТСАГ. Назовем его признаком потери устойчивости ЭТСАГ. Выявление такого признака позволит вовремя принять меры к исключению нарушения устойчивой работы ЭТСАГ или, как минимум, создать благоприятные условия для скорейшего восстановления нормального режима работы в случае потери системой устойчивости.

Для реализации этой задачи было выполнено компьютерное моделирование фрагмента ЭТСАГ (рис. 1) одного из предприятий нефтяной промышленности [5]. Система содержит источник внешнего электроснабжения, автономный газотурбинный генератор (представлен синхронной машиной мощностью 1600 кВт), асинхронную и статическую нагрузку. Источник внешнего электроснабжения моделируется эквивалентной ЭДС $E_{\text{ЭКВ}}$ и эквивалентным реактивным сопротивлением $x_{\text{ЭКВ}}$. Для электродвигательной нагрузки применяли электромеханические модели, а для

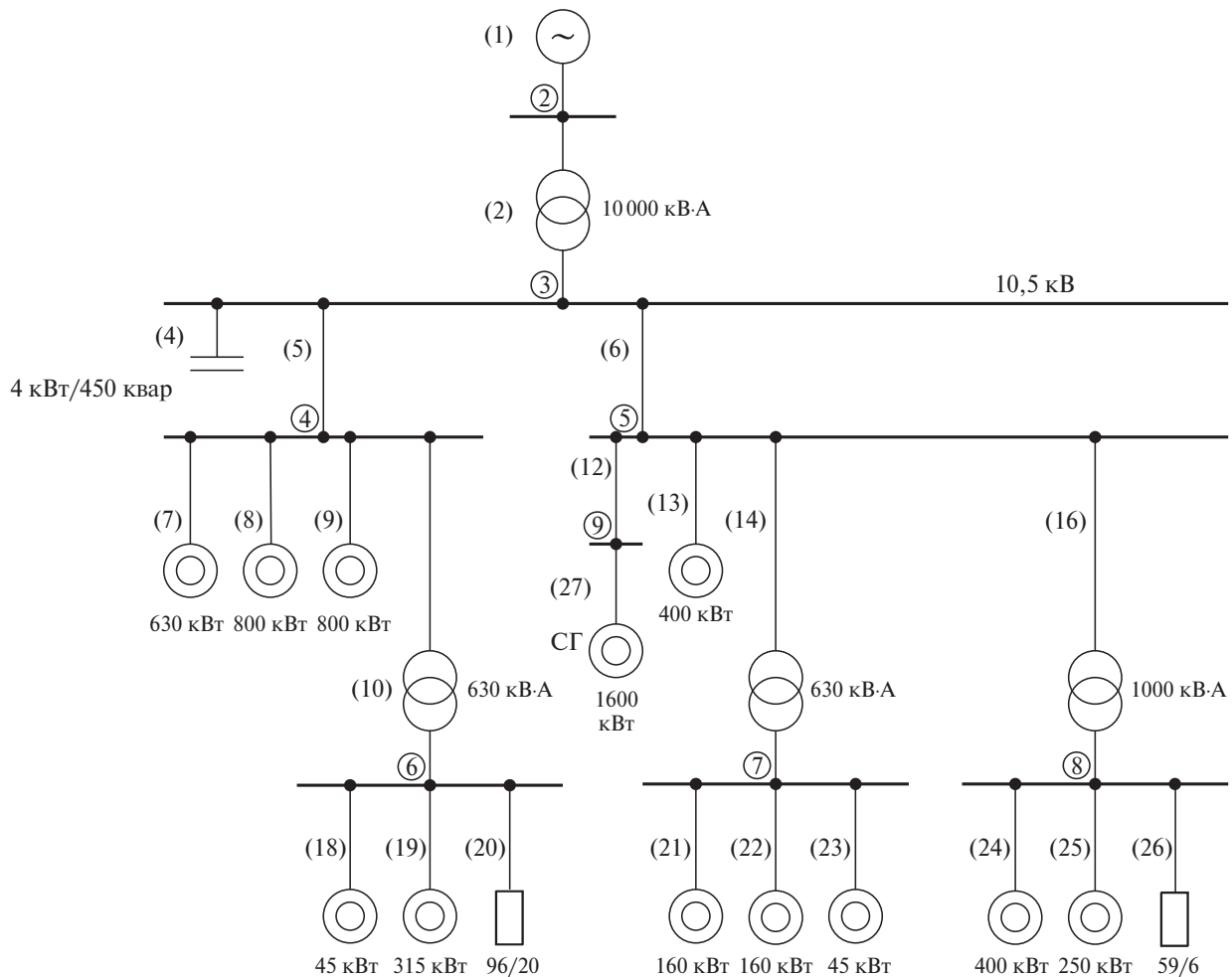


Рис. 1

автономного источника использовали электромагнитную модель, основанную на уравнениях Парка — Горева. Моделирование и расчеты выполняли в среде специализированного программного комплекса SAD.02.V4 [6], в котором можно раздельно исследовать режимы работы ЭТСАГ — с учетом и без учета переходных процессов в обмотке возбуждения синхронной машины. Вычислительные эксперименты проводили с учетом такой возможности.

В режиме моделирования без учета переходных процессов в результате вычислительных экспериментов была определена эквивалентная ЭДС статической устойчивости системы $E_{с.у}$. В ходе работ отмечен особый вид зависимости $U_9(t)$ перед моментом потери устойчивости системы¹. Каких-либо существенных выводов относительно вида зависимости сделать не удалось. Но в результате дальнейших экспериментов, при проведении

которых в моменты времени перед потерей устойчивости системы $E_{ЭКВ}$ повышалась до первоначального значения, обнаружен установившийся промежуточный режим. Полученная зависимость $t(E_{ЭКВ})$ приведена на рис. 2, где t — предельное значение времени, при котором система сохраняет устойчивость. Вид этой зависимости, определяющей границы устойчивости ЭТСАГ, полностью подтверждает результаты подобных экспериментов, описанных в [3].

Переход в установившийся промежуточный режим возможен при восстановлении $E_{ЭКВ}$ до значения 1 отн. ед.² в момент времени, когда процесс потери устойчивости уже начался, но условия ее сохранения не нарушены. Описана область значений $E_{ЭКВ}$, t , при которых может возникнуть установившийся промежуточный режим. Назовем ее областью возможного возникновения промежуточного режима (на рис. 2 она заштрихована). В обнаруженном промежуточном режиме установив-

¹ Здесь и далее на рисунках U_1 — напряжение на входе системы ($U_1 \equiv E_{ЭКВ}$), U_9 — напряжение на зажимах синхронного генератора.

² За базовое значение в 1 отн. ед. принято условно номинальное значение эквивалентной ЭДС $E_{ЭКВ}$, равное 10 500 В.

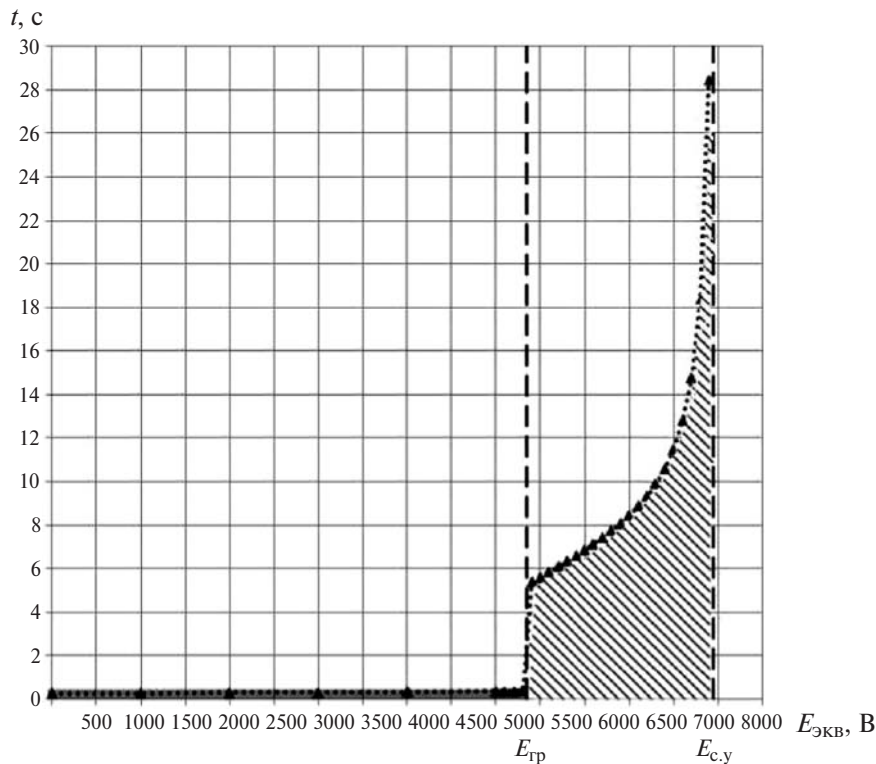


Рис. 2

шее значение $U_0 = 0,67$ отн. ед. Кроме того, для этого режима характерна следующая особенность: скольжение асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт равно 1, скольжение двигателей ветвей 7 и 13 (см. рис. 1) близко к номинальному, а у остальных двигателей оно находится в пределах $0,2 - 0,79$.

Исследована возможность восстановления системы из данного промежуточного режима в номинальный режим работы за счет отключения нескольких электродвигателей. Установлено, что существует некоторое граничное значение отключаемой мощности электродвигателей, которое позволяет ЭТС полностью восстановиться до номинального режима. Необходимо отметить, что это значение зависит от структуры системы. Для данной ЭТСАГ оно составило 205 кВт.

В дополнение к промежуточным режимам, возникающим при восстановлении эквивалентной ЭДС внешнего электроснабжения, была исследована возможность существования промежуточного режима при возмущениях со значениями $E_{ЭКВ}$, t , которые на рис. 2 выделены серым цветом. Полученные результаты показали, что в этом случае промежуточный режим отсутствует, но устойчивость системы нарушается. Следует отметить, что возможность такого развития событий, приводящих к появлению установившегося промежуточного режима, ранее не описывалась.

Далее исследовали влияние предаварийных режимов работы системы на значение ЭДС статической устойчивости ЭТСАГ. Анализировали зависимость граничного значения статической устойчивости от скорости снижения $E_{ЭКВ}$. За исходный параметр эксперимента принимали дискретный шаг провалов $E_{ЭКВ}$, т. е. скорость ее снижения. При этом соблюдалось условие выхода ЭТС на установившийся режим при новом значении $E_{ЭКВ}$. Кривые зависимости $E_{ЭКВ}(t)$ и $U_0(t)$ при заданном шаге провалов $E_{ЭКВ} = 100$ В приведены на рис. 3. Аналогичные эксперименты проводили при шаге провалов $E_{ЭКВ} = 500$ и 1000 В. Выявлено, что значение границы статической устойчивости в данных режимах не отличается от значения, полученного при скачкообразном провале напряжения.

Следует отметить, что в режиме моделирования работы ЭТСАГ без учета переходных процессов в обмотке возбуждения синхронной машины признака потери устойчивости ЭТСАГ не обнаружили, в связи с чем дальнейшие эксперименты выполняли в режиме моделирования ЭТС с их учетом. На первом этапе было выявлено значение эквивалентной ЭДС статической устойчивости $E_{с.у.}$, которое составило $0,42$ отн. ед.

В ходе исследований отмечены следующие особенности. При значениях $E_{ЭКВ}$ ниже $0,42$ отн. ед. на $1 - 5$ В ЭТСАГ переходит в

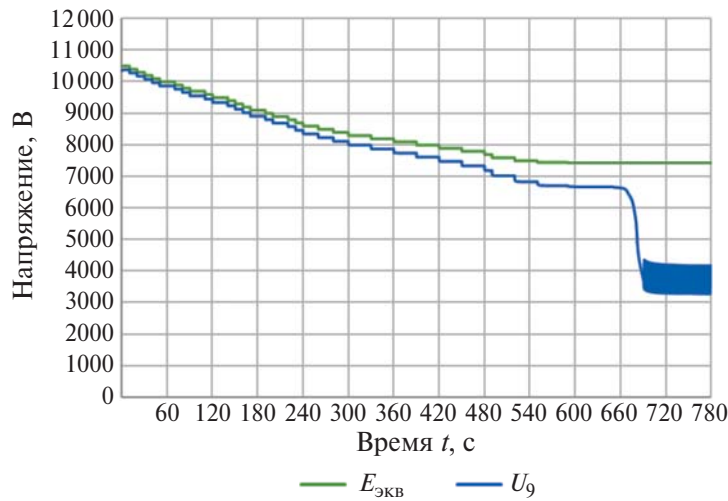


Рис. 3

устойчивый установившийся режим. При восстановлении $E_{ЭКВ}$ из данного режима до 1 отн. ед. происходит потеря устойчивости ЭТСАГ, вызванная потерей устойчивости синхронного генератора. При этом скольжение асинхронных двигателей близко к номинальным значениям, что может быть обусловлено резким возрастанием нагрузки на синхронный генератор. Для проверки данного предположения целесообразно провести дополнительные эксперименты, моделируя постепенное восстановление $E_{ЭКВ}$ до первоначального значения (в рамках данной работы такая задача не ставилась).

На следующем этапе исследований проверяли предположение о зависимости граничного значения устойчивости от предаварийного состояния ЭТС. Были повторены эксперименты по выявлению его зависимости от скорости снижения $E_{ЭКВ}$. Дискретный шаг провалов $E_{ЭКВ}$, т. е. скорость снижения $E_{ЭКВ}$ задавали с условием, что при новом значении $E_{ЭКВ}$ ЭТС выходит на установившийся режим. Выявлено, что при снижении $E_{ЭКВ}$ ступенчато с шагами 50, 100, 500 В граничное значение статической устойчивости уменьшается. Так, при снижении $E_{ЭКВ}$ с шагами 50, 100, 500 В оно составило 0,62 отн. ед.

Анализ результатов экспериментов показал, что устойчивость ЭТСАГ зависит от соотношения между $E_{ЭКВ}$ и напряжением на зажимах синхронного генератора U_9 . Установлено, что пока U_9 выше $E_{ЭКВ}$, ЭТСАГ находится в устойчивом состоянии, при котором скольжения всех асинхронных двигателей имеют номинальные значения. При уменьшении U_9 ниже $E_{ЭКВ}$ угол нагрузки синхронного генератора Θ постепенно достигает некоторого критического значения, после чего вращение асинхронных двигателей начинает замедлять-

ся, и в результате они останавливаются. Во всех случаях критическое значение угла Θ одинаково и для рассматриваемой ЭТС составляет 28° . Аналогичный характер имеет зависимость $\gamma(t)$ (где γ — угол между $E_{ЭКВ}$ и напряжением на зажимах синхронного генератора U_9). Критическое значение угла γ также во всех случаях одинаково и для данной ЭТС составляет $19,1^\circ$. Установлено, что зависимости $\Theta(t)$ и $\gamma(t)$ имеют особенный вид: на начальных участках происходит постепенное увеличение соответствующих значений, затем на некотором шаге — резкое снижение и вновь постепенное возрастание до критического значения, после которого нарушается работа асинхронных двигателей, а затем и ЭТСАГ в целом. Во всех случаях скачок происходит при снижении $E_{ЭКВ}$ до 0,96 отн. ед. Возможно, это связано с физикой процессов приема нагрузки синхронной машиной в зависимости от значения $E_{ЭКВ}$. Подробно выявленная особенность пока не исследовалась.

Основываясь на результатах описанных выше экспериментов, для быстрого обнаружения потери устойчивости ЭТСАГ предлагается использовать следующие ее признаки:

критический угол нагрузки синхронного генератора Θ ;

критическое значение угла γ ;

критическое отношение U_9 к $E_{ЭКВ}$, при снижении которого до значений меньше 1 отн. ед. начинают замедляться асинхронные двигатели;

критическая разность $\Delta_{крит} = U_9 - E_{ЭКВ}$, при уменьшении которой ниже нуля начинают замедляться асинхронные двигатели.

Графическое представление зависимостей предложенных критериев от провала напряжения $E_{ЭКВ}$ приведено на рис. 4.

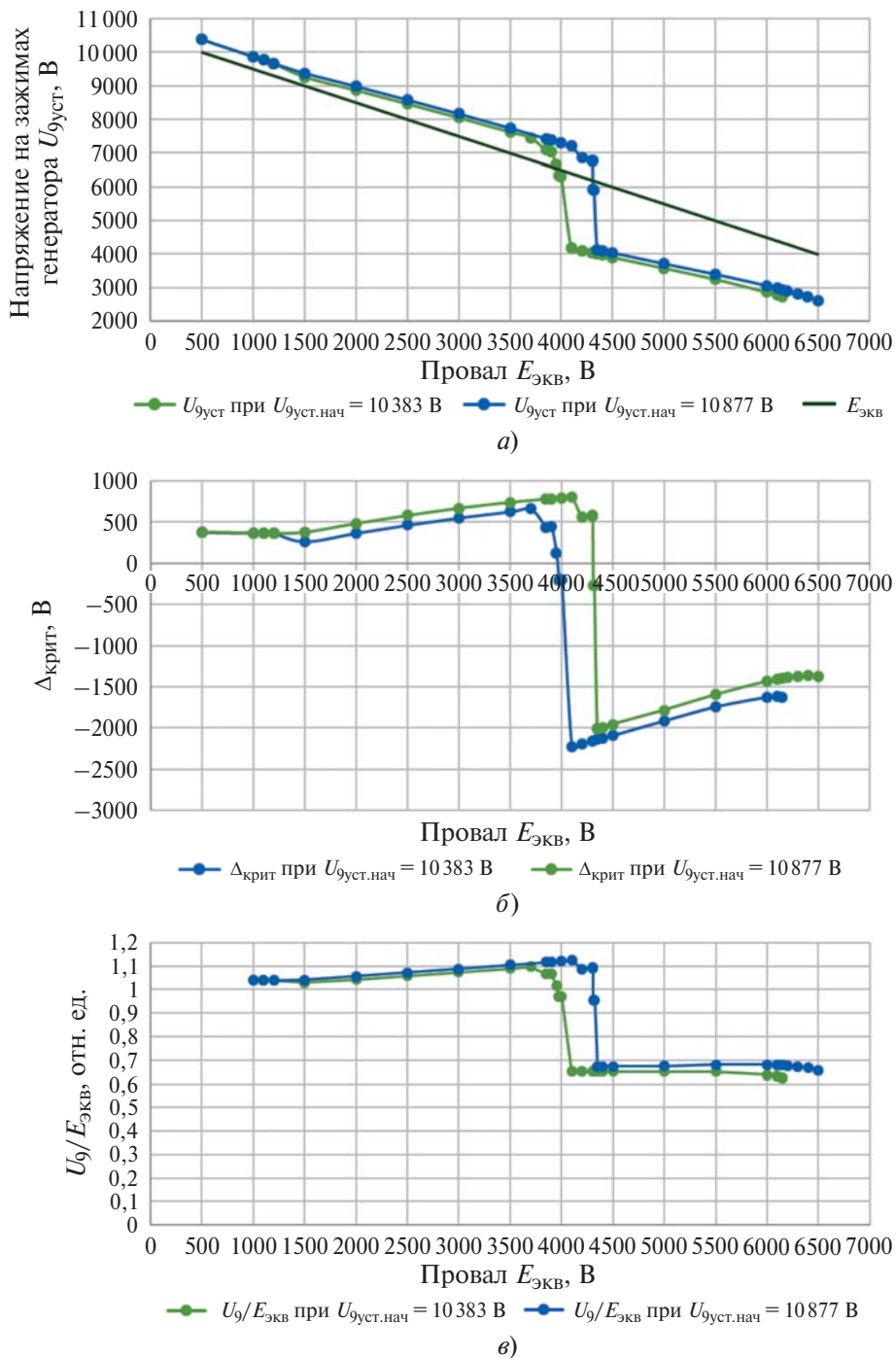


Рис. 4

Из результатов исследования видно, что по предложенным критериям можно определить критическое значение провала напряжения. При значениях $E_{\text{ЭКВ}}$ ниже критического начинают замедляться асинхронные двигатели, а при дальнейшем снижении теряет устойчивость и ЭТСАГ в целом.

Затем определяли зависимость граничного значения статической устойчивости от первоначального провала напряжения. Исследования, проводимые с различными шагами снижения $E_{\text{ЭКВ}}$ после первоначального провала

напряжения, показали, что значение шага не играет существенной роли. Кривая зависимости граничного значения статической устойчивости от первоначального провала напряжения приведена на рис. 5. Здесь виден четко выраженный максимум (значение первоначального провала напряжения — 0,12 отн. ед.), когда устойчивость ЭТСАГ нарушается при значениях $E_{\text{ЭКВ}}$ менее 0,71 отн. ед.

В ходе исследований обнаружены режимы, в которых при одинаковых значениях $E_{\text{ЭКВ}}$ составляющих 1 отн. ед., установившиеся

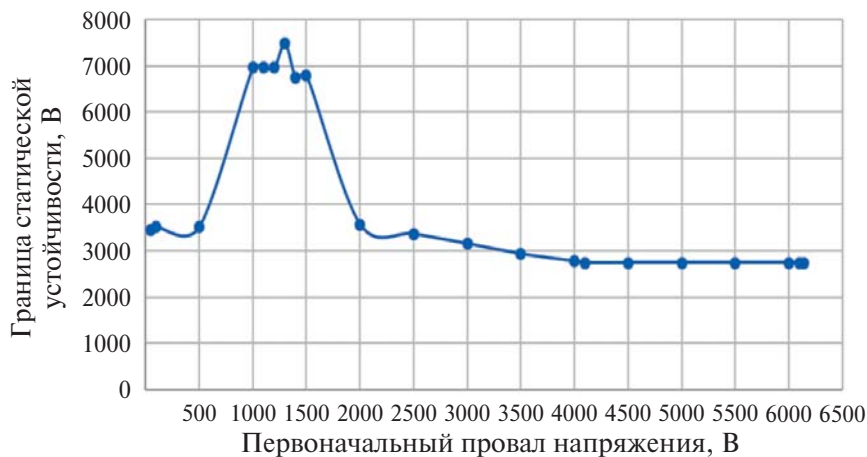


Рис. 5

значение напряжения на зажимах генератора $U_{уст}$ в одном случае оказывается равным 0,99 отн. ед., а в другом — 1,04 отн. ед. Отмечено, что переход в режим с $U_{уст} = 0,99$ отн. ед. возможен при изменении $E_{эКВ}$ в два шага. На первом шаге $E_{эКВ}$ снижается до значений от 0,62 отн. ед. до 0,71 отн. ед. и 0,95 отн. ед., а на втором восстанавливается до 1 отн. ед. Аналогично можно перейти из режима с $U_{уст} = 1,04$ отн. ед. в режим с $U_{уст} = 0,99$ отн. ед. При этом на первом шаге $E_{эКВ}$ снижается до значений, находящихся в пределах от 0,38 до 0,57 отн. ед. и от 0,81 до 0,86 отн. ед. Соответственно при различных значениях $U_{уст}$ существуют режимы с различными границами устойчивости ЭТСАГ, что также видно из рис. 4. Предполагается, что наличие подобных режимов обусловлено зоной нечувствительности регулятора напряжения синхронного генератора.

Итак, получены следующие результаты. В режимах, когда переходные процессы обмотки возбуждения не учтены:

выявлены условия перехода ЭТСАГ в промежуточный режим и установлены области $E_{эКВ}$, t , из которых возможен переход в установившиеся режимы;

определены условия восстановления системы из промежуточного режима в номинальный;

установлено, что скорость снижения $E_{эКВ}$ не влияет на значение эквивалентной ЭДС статической устойчивости;

не обнаружен признак потери устойчивости.

В случае учета переходных процессов:

выявлен факт потери устойчивости ЭТСАГ при резком восстановлении $E_{эКВ}$ после значительного ее провала;

определены зависимости признаков потери устойчивости от значения провала $E_{эКВ}$;

предложен способ определения граничного значения $E_{эКВ}$, при котором начинает замедляться вращение асинхронных двигателей; выявлена зависимость граничного значения статической устойчивости от первоначального скачка $E_{эКВ}$;

имеется возможность перехода в режимы работы с различными значениями U_0 в установившемся режиме при номинальном значении $E_{эКВ}$;

описаны условия перехода в эти режимы.

Список литературы

1. Ершов М. С., Егоров А. В., Яценко Д. Е. О влиянии параметров энергосистемы на устойчивость узлов электрической нагрузки промышленных предприятий. — Промышленная энергетика, 1997, № 5.
2. Егоров А. В., Новоселова Ю. В. Устойчивость крупных многомашинных комплексов как элемент надежности системы электроснабжения. — В кн.: Современные проблемы надежности систем энергетики: модели, рыночные отношения, управление реконструкцией и развитием. М.: Нефть и газ, 2000.
3. Ершов М. С., Егоров А. В., Новоселова Ю. В. О влиянии состава нагрузки на устойчивость промышленных электротехнических систем. — Промышленная энергетика, 2004, № 10.
4. Некоторые вопросы устойчивости промышленных электротехнических систем с генераторами собственных нужд / М. С. Ершов, А. В. Егоров, А. А. Трифонов, Е. И. Рудина. — Промышленная энергетика, 2006, № 8.
5. К вопросу о влиянии параметров питающей энергосистемы на устойчивость электротехнических систем смешанного состава / М. С. Ершов, А. В. Егоров, Ю. В. Новоселова, А. А. Трифонов. — В кн.: Научно-теоретические и методологические основы обеспечения энергонезависимости и энергоустойчивости объектов ОАО «Газпром». М.: ООО «ВНИИ-ГАЗ», 2001.
6. Меньшов Б. Г., Ершов М. С. Вопросы управления электротехническими системами нефтегазовых комплексов в аварийных режимах. — Промышленная энергетика, 1995, № 9.

anton.zverkov@gmail.ru