

Газизова О.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ВЫХОДЕ НА РАЗДЕЛЬНУЮ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ РАБОТУ

Одной из основных особенностей развития современной энергетики является использование промышленными предприятиями источников распределенной генерации. В структуре заводского электроснабжения при этом возникают крупные генерирующие узлы, существенно усложняющие вопросы управления эксплуатационными режимами. Одним из наиболее сложных режимов является выход такого узла с нагрузкой на раздельную с энергосистемой работу. При условии длительного существования подобного режима и оценки его допустимости необходимо оценить статическую устойчивость синхронных генераторов. Для анализа статической устойчивости промышленных генераторов разработан усовершенствованный алгоритм, учитывающий особенности промышленной нагрузки и автоматических регуляторов заводских электростанций. Получены величины регулирующего эффекта характерных электроприемников металлургического производства. Анализ устойчивости проводился с помощью программного комплекса «КАТРАН» на примере заводской электростанции, имеющей сложную конфигурацию. Определены возможность раздельной работы с энергосистемой в зависимости от состава оборудования и коэффициент запаса статической устойчивости в различных эксплуатационных режимах. Оценена эффективность работы систем автоматического регулирования синхронных генераторов. Получены рекомендации по повышению надежности работы делительной автоматики в рамках промышленной электростанции. Разработаны мероприятия по повышению эффективности управления режимами работы электростанции при отделении от энергосистемы.

**Ключевые слова:** заводской синхронный генератор, статическая устойчивость, программный комплекс, автоматический регулятор возбуждения, автоматический регулятор скорости, параллельная работа, раздельная работа, делительная автоматика.

### ВВЕДЕНИЕ

Аналізу статической устойчивости синхронных генераторов посвящено значительное количество работ как отечественных [1-5], так и зарубежных ученых [6-10]. Прежде всего, внимание уделяется исследованию статической устойчивости генератора при его работе на шины бесконечной мощности. Такой подход является наиболее простым, но малоподходящим для сложных электроэнергетических систем. Для подобных систем разработано значительное количество методов. Основным из них является метод малых колебаний. На его основе используются другие практические критерии, предполагающие составление характеристического уравнения. Ряд современных программных комплексов также применяет данный подход.

К другой группе относятся практические методы, основанные на критерии  $dP/d\delta > 0$ , которые предполагают непосредственное определение параметров установившихся режимов с использованием метода последовательного утяжеления. Такой способ может быть применен для оценки статической устойчивости промышленных синхронных генераторов с учетом характеристик нагрузки [11-14].

Как отмечалось ранее, возможность выхода на раздельную работу промышленной электростанции делает необходимым на этапе проектирования и эксплуатации анализ эффективности делительной автоматики [15-17]. Чтобы оценить успешность выхода на раздельную работу, прежде всего, необходимо определить наличие установившегося режима автономной работы и коэффициенты запаса статической устойчивости синхронных генераторов в узле. При анализе статической устойчивости промышленных электростанций необходимо учитывать регулирующий эффект промышлен-

ной нагрузки, особенности работы автоматических регуляторов возбуждения и скорости синхронных генераторов. Основная специфика обусловлена зависимостью вырабатываемой активной мощности от тепловой нагрузки, в том числе при автономном режиме.

Таким образом, возможность устойчивой автономной работы синхронного генератора зависит от существенного количества факторов, в том числе исходного режима работы, корректности действия регуляторов машин и статических характеристик нагрузки.

Математическому моделированию элементов электроэнергетических систем посвящено большое количество работ [18-23]. Для анализа подобных режимов были разработаны соответствующие математические модели синхронных генераторов, учитывающие характеристики автоматических регуляторов с необходимой степенью точности. Модель была учтена в усовершенствованном алгоритме анализа статической устойчивости промышленных электростанций при раздельной работе с энергосистемой. Разработанный на кафедре электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Г.И. Носова программный комплекс «КАТРАН» [24] позволяет рассчитывать параметры автономных режимов промышленных электростанций с учетом производительности механизмов собственных нужд и определять запас устойчивости источников и двигательной нагрузки в подобных режимах.

### ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АВТОНОМНЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ И СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Математическому моделированию синхронных генераторов посвящено большое число трудов [25-32]. В общем случае математическое моделирование источников распределенной генерации с целью расчета установившихся режимов сводится к представлению генератора ЭДС за определенным сопротивлением.

Анализ статической устойчивости режимов выхода на раздельную работу промышленных электростанций с нагрузкой требует учета ряда нижеперечисленных особенностей [25]. Прежде всего, при автономных режимах напряжения и частота зависят от двух факторов: действия регуляторов возбуждения и скорости источников распределенной генерации и регулирующего эффекта нагрузки. В настоящее время большое число работ посвящено определению регулирующего эффекта нагрузки [26, 27]. Но, как правило, подобные исследования проводились для крупных энергосистем и в результате были получены обобщенные величины. Выход на раздельную работу промышленной электростанции будет существенно зависеть от регулирующего эффекта промышленной нагрузки, то есть нагрузки соответствующих цехов. В связи с этим был проанализирован состав нагрузки металлургического предприятия, получены математические модели электроприемников, на основе которых с учетом характеристик распределительной сети был получен регулирующий эффект нагрузки, приведенный в табл. 1.

Таблица 1

Регулирующий эффект основных производственных цехов металлургического предприятия

Наименование цеха, отделения	Регулирующий эффект нагрузки, отн. ед.			
	$\Delta P/\Delta f$	$\Delta Q/\Delta f$	$\Delta P/\Delta U$	$\Delta Q/\Delta U$
Аглофабрика	1,85	2,62	0	-1,91
Собственные нужды паровоздуховодной электростанции	2,51	1,72	0,11	3,22
Собственные нужды теплоэлектростанции	2,94	1,92	0,01	2,1
Листопрокатный цех. Низковольтная нагрузка	2,67	4,31	0,02	0,33
Коксовый цех	1,08	0,99	0,21	2,02
Цех улавливания	2,68	2,49	0,02	1,29
Насосная	3,13	0,41	-0,1	2,21
Паросиловой цех.	2,69	3,48	0,02	0,44
Доменный цех	1,37	-10	0,05	-9
Кислородно-конвертерный цех. Конвертерное отделение	1,46	2,58	0,24	0,85
Кислородная станция	2,8	1,55	0	4,27
Цех изложниц	-0,36	-0,48	1,28	1,88
Кислородно-конвертерный цех. Отделение непрерывной разливки стали	0,59	0,29	0,11	1,68
Мартен. Внепечная обработка стали	2,08	2,35	0,18	1,24
Фасонно-литейный цех	0,38	-0,02	1,01	1,62
Листопрокатный цех. Чистовая группа клетей	0,09	0,04	0	1,86
Листопрокатный цех. Черновая группа клетей	1,12	1,49	0	-5
Копровый цех	2,59	6,23	0	-2,18
Листопрокатный цех. Прокатное отделение	0,79	-3,14	0,13	-8
Листопрокатный цех. Отделение покрытий	1,13	0,58	0	1,64

При расчете автономных режимов с целью анализа статической устойчивости и эффективности работы делительной автоматики необходимо определить нагрузку, которая выйдет на раздельную работу в соответствии с конфигурацией сети, и внести соответствующие изменения в расчетную схему [28].

Следующим важным фактором является учет действия автоматического регулятора возбуждения и его статизма. Очевидно, что при отделении от энергосистемы он должен отработать на постоянство напряжения в соответствии с текущей уставкой [29, 30]. Однако в силу того, что маломощные генераторы работают в нормальном режиме в параллель с энергосистемой большой мощности, то зачастую при эксплуатации установок по различным причинам напряжение уставки может изменяться вручную. Это повлияет на уровень напряжения в выделенном участке сети и, следовательно, на регулирующий эффект нагрузки. Поэтому учет предшествующего режима при определении показателей устойчивости также является важным фактором [31, 32].

Уровень частоты в выделенном на работу узле обусловлен статизмом и настройкой регуляторов частоты каждого из генераторов. При отсутствии дефицита активной мощности и корректном действии регулятора скорости в автономном участке должна установиться частота, близкая к номинальной. Однако, как показал опыт эксплуатации теплоэлектростанций, могут возникнуть сложности по двум основным причинам. Во-первых, неправильное действие или несрабатывание самого регулятора. При этом один из генераторов не участвует в регулировании частоты и выдает фиксированное значение мощности. Во втором случае большую роль играют особенности теплоэлектростанций. Как известно, турбогенераторы на таких электростанциях выдают как активную мощность в сеть, так и несут тепловую нагрузку. Фактически, каждый генератор может работать либо по электрическому, либо по тепловому графику. Очевидно, что при работе по электрическому графику при выходе на раздельную работу генератор с регулирования активной мощности переходит на поддержание активной мощности и частоты. В случае работы по тепловому графику при отделении от энергосистемы генератор может работать на поддержание давления в паропроводе и выдавать в сеть фиксированное значение активной мощности. При этом в общем регулировании частоты он не участвует.

Все изложенные моменты по регулированию скорости справедливы для случая, когда в рассматриваемом узле отсутствует дефицит активной и реактивной мощности. При наличии дефицита переходные процессы имеют негативный характер, и автономный установившийся режим может не наступить.

Последним фактором, который следует отметить, является учет производительности механизмов собственных нужд. При возникновении дефицита активной мощности при выходе на раздельную работу будет наблюдаться снижение частоты. Это приведет к снижению производительности питательных насосов и, как следствие, к снижению максимальной мощности, которая может быть выработана турбогенераторами. При существенном снижении частоты это может привести к лавине частоты и погасанию механизмов собственных нужд.

На рис. 1 показан алгоритм определения статической устойчивости узла при автономной работе с учетом перечисленных факторов.

Таким образом, для исследования статической устойчивости в автономном режиме работы используется сочетание метода последовательного эквивалентирования для расчета установившегося режима работы и метода последовательного утяжеления. При расчете режима учитываются уставки регуляторов возбуждения и скорости в исходном режиме, статические характеристики автоматических регуляторов и статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте. При снижении частоты корректируется мощность, выдаваемая генераторами. Если в результате расчета имеет место наличие сходимости, то в заданной точке сети производят утяжеление активной и ре-

активной мощности. Критическим считается режим, в котором отсутствует сходимость. После его определения строятся угловые характеристики каждого из генераторов, и в соответствии с фактическими нагрузками определяется коэффициент запаса статической устойчивости. Как известно, в нормальном режиме он должен быть не менее 20%, а в утяжеленном 10%.

Указанный алгоритм был использован при разработке программного комплекса «КАТРАН». Помимо анализа статической устойчивости генераторов с его помощью при необходимости может быть определен запас устойчивости синхронных и асинхронных двигателей. Как показали расчеты, в целом асинхронные двигатели при выходе на раздельную работу имеют более высокий коэффициент запаса.

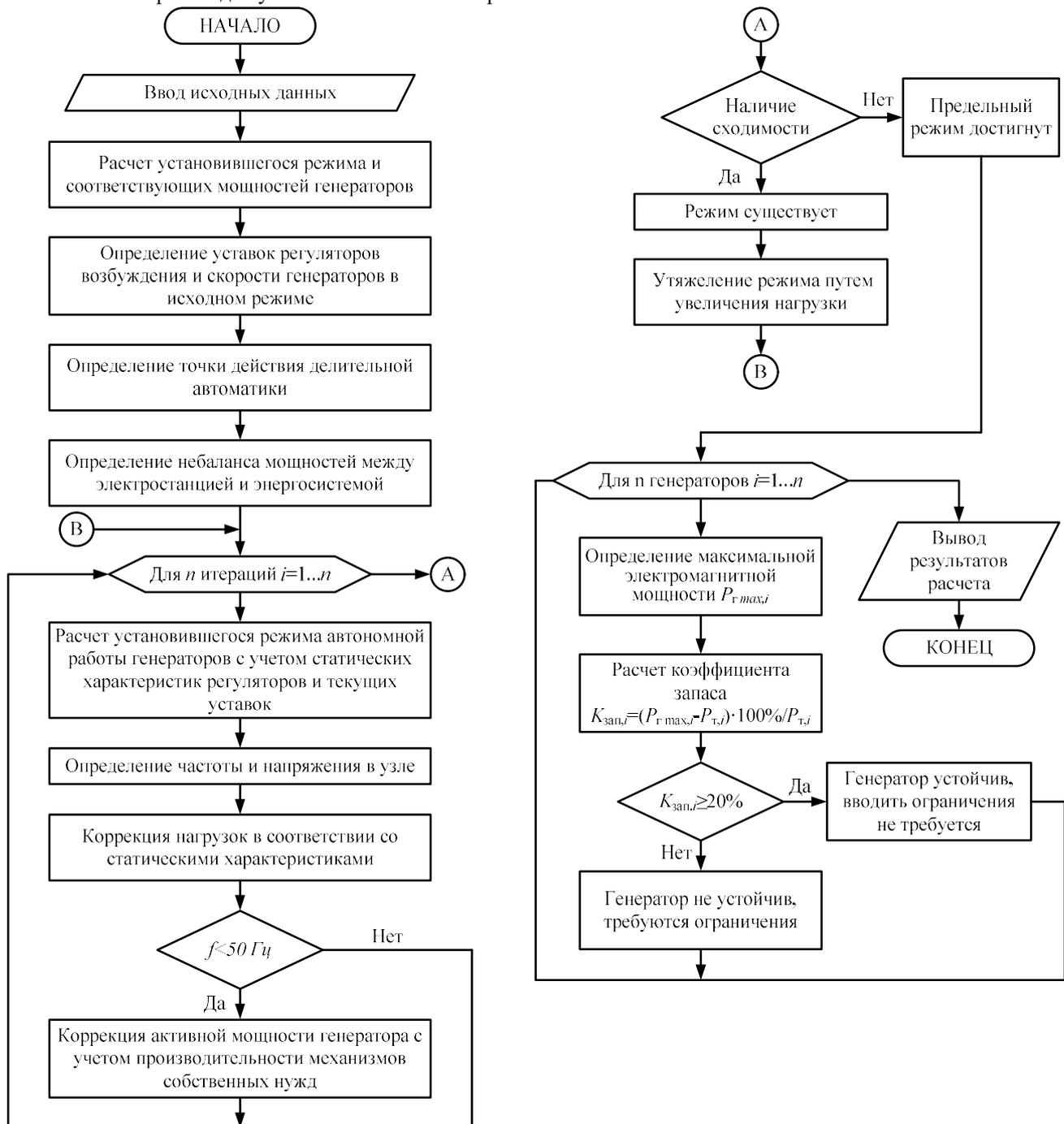


Рис. 1. Алгоритм анализа статической устойчивости

РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА  
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «КАТРАН»  
НА ПРИМЕРЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Расчет режимов осуществлялся с помощью программного комплекса «КАТРАН», разработанного на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова. Расчеты проводились на примере промышленной электростанции, показанной на рис. 2, в состав которой входят генераторы различной установленной мощности.

Выход на раздельную работу у электростанции такой конфигурации может осуществляться в зависимо-

сти от способа работы делительной автоматики по шинам 3, 6, 10 и 110 кВ. Успешность выхода зависит от текущего состава генерирующего оборудования, нагрузки и корректной работы регуляторов возбуждения и скорости. В качестве примера рассмотрим выход на раздельную работу генераторного распределительного устройства 10,5 кВ при работе всех генераторов. В этом случае на раздельную работу выходит 8 турбогенераторов единичной установленной мощностью до 30 МВт с нагрузкой, включающей собственные нужды электростанции и близлежащие цеха.

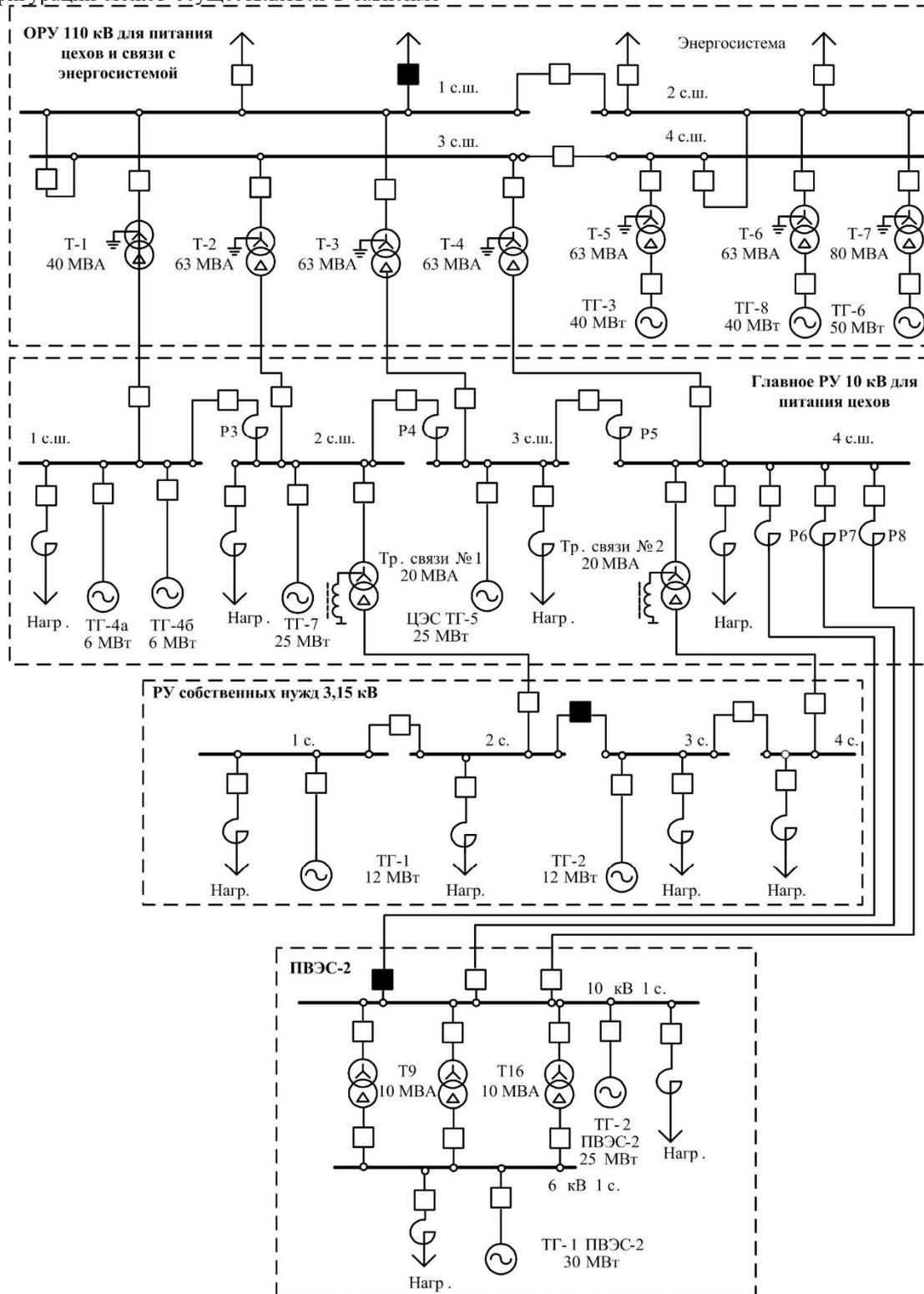


Рис. 2. Принципиальная однолинейная схема электрических соединений промышленной электростанции

Для этих расчетов предварительно были определены эквивалентные статические характеристики для всех нагрузок в узле в соответствии с цехами, к которым они относятся.

При параллельной работе с энергосистемой поточное распределение в сети при наибольших мощностях имело вид, приведенный в табл. 2.

После выхода на раздельную работу от энергосистемы получаем небаланс мощностей путем вычитания генерируемой мощности и мощности нагрузки:

$$\Delta P = 143,5 - 97,5 = 46 \text{ МВт}, \Delta Q = 35,1 - 82,1 = -47 \text{ Мвар}.$$

Очевидно, что в рассматриваемом узле на момент выхода имеется избыток активной мощности и дефицит реактивной. Для ликвидации небаланса в соответствии со своими статическими характеристиками должны отработать системы регулирования турбин и возбуждения.

Рассмотрим работу систем регулирования турбин при указанном небалансе мощностей. Статизм регуляторов скорости примем равным средним 5 %.

При этих условиях максимальная частота в узле составит

$$n = 50 \cdot 1,05 = 52,5 \text{ Гц}.$$

При данном избытке активной мощности после работы регуляторов скорости установится частота, Гц:

$$n = 52,5 - \frac{n_{\text{ном}} P_{\text{нагр}} \cdot 0,05}{P_{\text{генер}}} = 52,5 - \frac{50 \cdot 97,5 \cdot 0,05}{143,5} = 50,8,$$

где  $P_{\text{нагр}}$ ,  $P_{\text{генер}}$  – фактическая потребляемая и генерируемая активная мощность в узле, МВт.

Таблица 2

Потоки мощности, протекающие по соответствующим участкам сети

Номер присоединения	$P$ , МВт	$Q$ , Мвар
T1 110/10	2	-6
T2 110/10	8	-15
T3 110/10	16	-6
T4 110/10	20	-20
T1 10/3	3,5	-2
T2 10/3	2	-1,5
ТГ1	12,5	2,5
ТГ2	11	3
ТГ4а	5,5	2
ТГ4б	5,5	2
ТГ7	26	6
ТГ5	30	6
ТГ1 ПВЭС-2	30	7,6
ТГ2 ПВЭС-2	23	6
Нагрузка собственных нужд электростанции	18	9
Нагрузка ПВЭС-2 в узле	26	18,6
Мощность, выдаваемая на шины 110 кВ	46	-47
Мощность, получаемая от ПВЭС-2 по шинам 110 кВ	27	-5
Суммарная вырабатываемая мощность в узле	143,5	35,1
Суммарная потребляемая мощность в узле	97,5	82,1

Если учесть регулирующий эффект нагрузки, то получим, Гц:

$$n = 52,5 - \frac{n_{\text{ном}} \cdot \left( P_{\text{нагр}} + \frac{0,8}{50} \cdot \frac{P_{\text{нагр}}}{0,53} \right) \cdot 0,05}{P_{\text{генер}}} = 52,5 - \frac{50 \cdot 100,4 \cdot 0,05}{143,5} = 50,7.$$

Зная установившуюся частоту, можем определить, сколько в таком режиме выдает каждый из генераторов. На примере генератора Г1 получим

$$P = P - \Delta P = P_G - \frac{\Delta n}{n_{\text{ном}} \cdot 0,05} P_G = 12,5 - \frac{0,7}{50 \cdot 0,05} \cdot 12,5 = 12,5 \cdot 0,72 = 9 \text{ МВт},$$

где  $P_G$  – фактическая генерируемая активная мощность генератора в доаварийном режиме, МВт.

Расчеты по остальным турбогенераторам сведены в табл. 3.

Зная новые величины активной мощности, мы можем определить возможную выработку генераторами реактивной с целью ее ликвидации в узле. Необходимо отметить, что максимально допустимая реактивная мощность генераторов должна определяться по нагрузочной диаграмме при известной активной мощности. В табл. 3 приведена фактическая мощность, вырабатываемая генераторами в режиме раздельной работы, потенциальная реактивная мощность, которую могут выработать генераторы с учетом несовершенства систем охлаждения, а также запас статической устойчивости. В табл. 3 приведены следующие величины:  $k_{\text{зап}}$ ,  $k_{\text{зап1}}$  – коэффициенты запаса статической устойчивости генераторов при правильной работе регуляторов скорости и в случае несрабатывания регулятора на одной из машин, %;  $Q$ ,  $Q_1$  – реактивные мощности, полученные непосредственно по нагрузочной диаграмме и с поправкой на нагрев обмоток (10%), Мвар.

Очевидно, что при нагрузке 82,1 Мвар, если все генераторы работают, небаланс мощностей будет успешно ликвидирован. Однако оставшийся резерв реактивной мощности весьма небольшой и составляет 17 Мвар. При этом запас статической устойчивости машин небольшой, но достаточный для послеаварийного режима.

Таблица 3

Параметры режима раздельной работы

Номер ТГ	$P$ , МВт	$Q$ по нагрузочной диаграмме, Мвар	$Q_1$ , Мвар	$P_{\text{эл. магн. макс}}$	$k_{\text{зап}}$ , %	$k_{\text{зап1}}$ , %
ТГ1	9	9	8,1	14,1	56	17,5
ТГ2	7,92	9	8,1	14,4	81	20
ТГ4а	3,96	4,5	4,05	7,2	80	20
ТГ4б	3,96	4,5	4,05	7,3	80	22
ТГ7	18,72	20,25	18,2	30	60	11
ТГ5	21,6	18,75	16,9	32	48	28
ТГ1 ПВЭС-2	21,6	22,5	20,25	36	67	20
ТГ2 ПВЭС-2	16,56	18,75	16,9	30	81	20
Суммарная мощность	103,3	107,25	96,55			

При проведении расчетов учитывались все ранее указанные факторы. Как показал анализ полученных данных, с целью повышения эффективности делительной автоматики необходимо планировать нормальные режимы. В частности, производить согласование между электростанциями при выводе генераторов в плановые ремонты. При аварийных простоях крупных генераторов по возможности избегать плановых ремонтов других машин с целью недопущения дефицитных режимов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены вопросы анализа статической устойчивости синхронных генераторов мощностью до 60 МВт в условиях промышленного электроснабжения.

Для характерных цехов промышленного предприятия получен регулирующий эффект, по которому определены комплексные статические характеристики нагрузки промышленной подстанции.

Разработана математическая модель синхронного генератора, учитывающая особенности действия регуляторов возбуждения, скорости и влияние производительности механизмов собственных нужд на параметры режима при раздельной работе. Данная модель может быть положена в основу усовершенствованного алгоритма анализа статической устойчивости промышленных синхронных генераторов. Разработанный алгоритм был учтен при написании программного комплекса «КАТРАН». Расчеты режимов с помощью указанного комплекса велись применительно к промышленной электростанции сложной конфигурации с турбогенераторами различной мощности.

Расчеты показали, что для обеспечения устойчивой работы генераторов при отделении от энергосистемы необходимо учитывать такие факторы, как особенности систем регулирования возбуждения и скорости, небаланс мощностей при отделении от энергосистемы, регулирующий эффект нагрузки.

Разработанный программный комплекс может быть использован для анализа возможных аварийных и послеаварийных режимов в качестве советчика диспетчера для оперативно-диспетчерского персонала промышленных электростанций.

С целью повышения устойчивости синхронных генераторов при выходе на раздельную работу рекомендуется более тщательно планировать ремонтные режимы. В частности, необходимо избегать одновременно отключения двух и более крупных генераторов во избежание возникновения дефицита активной и реактивной мощностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем: монография. Кн. 1. СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. 369 с.
- Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.
- Ачитаев А.А., Удалов С.Н., Юманов М.С. Повышение запаса регулировочной способности генераторов в энергетических системах с распределенной генерацией // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. VII Международной научной конференции молодых ученых. Новосибирск: НГТУ, 2015. С. 8-10.
- Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 392 с.
- Некоторые вопросы анализа статической устойчивости электроэнергетических систем / Е.К. Лоханин, Е.Л. Росовский, Ю.Н. Гараев, Ю.В. Морозкин, В.А. Глаголев // Электричество. 2013. № 9. С. 2-6.
- Perzhabinsky S.M., Karamov D.N., Achitayev A.A. A Model of Reliability Optimization of a Stand-Alone Electric Power System with Constraints on Dynamic Stability of the Wind Turbine // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2021. Vol. 14. No 1. Pp. 55-71. doi: 10.17516/1999-494X-0288
- Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems / Yosra Welhazi, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah. // J. Electrical Systems. 2014. No. 10-3. Pp. 276-291.
- Shi X., Mu Sh. Research on Measures to Improve Stability of the Power System // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 742. Pp. 648-652. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.742.648
- Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. Vol. 6 Iss. 10. Pp. 977-985.
- Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2013. Vol. 49. Iss. 1. Pp. 38-47.
- Определение статических характеристик нагрузки по напряжению по данным пассивного эксперимента с учётом реакции сети / А.В. Панкратов, А.К. Жуikov, А.А. Шувалова, В.И. Полишук // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2 (51). С. 4-11. doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-4-11
- Повышение качества электроснабжения современного ГОКа / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, Ю.Н. Кондрашова, К.Э. Одинцов // Горный журнал. 2020. № 12. С. 82-86. doi: 10.17580/gzh.2020.12.19
- Ротанова Ю.Н. Повышение устойчивости системы электроснабжения промышленного предприятия с собственными электростанциями при коротких замыканиях: дис. ... канд. техн. наук / Ротанова Юлия Николаевна. Магнитогорск, 2008.
- Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения / В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов, А.Р. Губайдуллин, О.И. Карандаева, Ю.Н. Кондрашова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 2. С. 68-79.
- Совалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1988. 416 с.
- Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость: пер. с англ. / под ред. Я.Н. Лугинского. М.: Энергия, 1980. 568 с.
- Kothari D.P., Nagrath I.J. Power System Engineering. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
- Кавалеров Б.В., Зиятдинов И.Р. Построение статических моделей синхронного генератора по экспериментальным данным // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 34. С. 186-197. doi: 10.15593/2224-9397/2020.2.11
- Варганова А.В. Алгоритм внутростанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 17-22.
- Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129.

- Рр. 951-955. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.142
21. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization / A.V. Varganova, E.A. Panova, N.A. Kurilova, A.T. Nasibullin // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015. doi:10.1109/MEACS.2015.7414907
  22. Анализ допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации / О.В. Газизова, А.П. Соколов, Н.Т. Патшин, Ю.Н. Кондрашова // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 12-18. doi: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18
  23. Sokolov A.P., Gazizova O.V., Kondrashova Y.N. Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems. 2019. 012033. doi:10.1088/1757-899X/666/1/012033
  24. Свидетельство о гос. регистрации прогн. для ЭВМ № RU 2019610251. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0 / Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Панова Е.А., Варганова А.В., Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Зиновьев В.В., Юлдашева А.И., Крубцова А.А., Анисимова Н.А., Насибуллин А.Т., Трemasов М.А., Щербакова В.С., Богуш В.К.; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 29.10.2018, опубл. 09.01.2019.
  25. Малафеев А.В., Газизова О.В. Оценка статической устойчивости генераторов заводских электростанций при параллельной и раздельной с энергосистемой работе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2010. №9-10. С. 81-91.
  26. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)". 2016. 012056. doi: 10.1088/1757-899X/124/1/012056
  27. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. № 4. С. 115-118.
  28. Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 3(32). С. 27-38. doi: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-27-38
  29. Gazizova O.V., Sokolov A.P. Research of the Effectiveness of Existing Laws of Automatic Regulation of Excitation of Synchronous Generators of Industrial Power Plants Under Various Conditions of Connection to the Electric Power System // Proceedings of Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice (PEAMI). 2020. Pp. 50-55. doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234362
  30. Sokolov A.P., Gazizova O.V. Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation // International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA). 2018. 8537190. doi: 10.1109/RPA.2018.8537190
  31. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability // Proceedings Engineering. 2015. Vol. 128. Pp. 759-763. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.100
  32. Газизова О.В., Малафеев А.В., Кондрашова Ю.Н. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. № 4. С. 12-22. doi: 10.14529/power160402

Поступила в редакцию 17 июня 2021 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### STATIC SUSTAINABILITY ANALYSIS OF GENERATORS AT INDUSTRIAL POWER PLANTS OPERATING SEPARATELY FROM THE ENERGY SYSTEM

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logan\_b\_7@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

One of the main features in the modern energy development is the use of distributed generation industrial enterprises. In the structure of factory power supply, large generating nodes arise significantly complicating the operational mode management. One of the most complex modes is the output of such a node with a load on a separate operation from a power system. Subject to the long existence of such a mode and evaluation of its permissibility, it is necessary to evaluate the static stability of synchronous generators. To analyze the static stability of industrial generators, an improved algorithm has been developed that takes into account the peculiarities of industrial load and automatic regulators of factory power plants. The values of the regulating effect of characteristic electrical receivers at metallurgical production are obtained. Sustainability analysis was carried out using the KATRAN software package on the example

of a factory power plant having a complex configuration. The possibility of separate work from the power system is determined depending on the equipment composition and the reserve coefficient of static sustainability in various operational modes. The effectiveness of the operation of automatic control systems for synchronous generators is estimated. Recommendations were obtained to improve the division automation reliability in the framework of an industrial power plant. Events have been developed to improve the management efficiency of the power plant mode during separation from the power system.

**Keywords:** factory synchronous generator, static stability, software package, automatic excitation regulator, automatic speed controller, parallel operation, separate work, separating automation.

REFERENCES

- Meleshkin G.A., Merkuryev G.V. *Ustojchivost energosistem. Kniga 1* [Stability of power systems. Book 1] St. Petersburg, Center for training of energy personnel Publ., 2006, 369 p.
- Zhdanov P.S. *Voprosy ustojchivosti energeticheskikh sistem* [Issues of power systems stability]. Moscow, Energy Publ., 1979, 456 p. (In Russian)
- Achitayev A.A., Udalov S.N., Yumanov M. S. Increase of an inventory of generator adjusting ability in power systems with distributed generation. *Elektrotehnika. Elektrotehnologiya. Energetika: sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodykh uchenykh* [Collection of scientific papers of the VII International scientific conference of young scientists "Electrical engineering. Electrotechnology. Power engineering"]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2015. pp. 8-10. (In Russian)
- Kimbarik E. *Sinhronnye mashiny i ustojchivost elektricheskikh sistem* [Synchronous machines and stability of electrical systems]. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1960, 392 p. (In Russian)
- Lohain E.K., Rosovsky E.L., Garayev Yu.N., Moroshkin-Yu.V., Glagolev V.A. Some issues of analyzing the static stability of electric power systems. *Elektrichestvo* [Electricity], 2013, no. 9, pp. 2-6. (In Russian)
- Perzhabinsky S.M., Karamov D.N., Achitayev A.A. A Model of Reliability Optimization of a Stand-Alone Electric Power System with Constraints on Dynamic Stability of the Wind Turbine. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2021, vol. 14, no 1, pp. 55-71. doi: 10.17516/1999-494X-0288
- Yosra Welhazi, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems*, 2014, no. 10-3, pp. 276-291.
- Shi X., Mu Sh. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 742, pp. 648-652. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.742.648
- Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2012, vol. 6. Iss. 10, pp. 977-985.
- Satheesh A. Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2013, vol. 49. Iss. 1, pp. 38-47.
- Pankratov A.V., Zhuykov A.K., Shuvova A.A., Polishchuk V.I. Determining the static characteristics of the load on the voltage according to the passive experiment, taking into account the reaction of Networks. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 4-11. (In Russian) doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-4-11
- Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Kondrashova Yu.N., Odintsov K.E. Improving the quality of the power supply of modern GOK. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 2020, no. 12, pp. 82-86. doi.org/10.17580/gzh.2020.12.19 (In Russian)
- Rotanova Yu.N. *Povyshenie ustojchivosti sistemy elektrosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya s sobstvennymi elektrostanciyami pri korotkikh замыkaniyah*. Kand. Diss. [Increasing the sustainability of the power supply system of an industrial enterprise with its own power plants with short circuits. Ph.D. Diss.]. Magnitogorsk, 2008. (In Russian)
- Khramshin V.R., Odintsov K.E., Gubajdullin A.R., Karandaeva O.I., Kondrashova Yu.N. Fault Rate Analysis of Variable-Frequency Electric Drives in District Heating Stations under Power Supply Violations. *Vestnik YUzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2014, vol. 14, no. 2, pp. 68-79. (In Russian)
- Sovalov S.A., Semenov V.A. *Protivoavarijnoe upravlenie v energosistemah* [Antiemergency control in power supply systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005, 416 p. (In Russian)
- Anderson P., Fuad A. *Upravlenie energosistemami i ustojchivost* [Energy Systems Control and Stability]. Moscow, Energy Publ., 1980, 568 p. (In Russian)
- Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System Engineering*. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
- Kavalerov B.V., Ziydinov I.R. Construction of static models of a synchronous generator according to experimental data. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems], 2020, no. 34, pp. 186-197. (In Russian). doi: 10.15593/2224-9397/2020.2.11
- Varganova A.V. Algorithm of intraoffice optimization of operation modes of boilers and turbogenerators of industrial power plants. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2018, no. 1, pp. 17-22. (In Russian)
- Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 951-955. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.142
- Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*, 2015. doi:10.1109/MEACS.2015.7414907
- Gazizova O.V., Sokolov A.P., Patshin N.T., Kondrashova Yu.N. Analysis of the permissibility of the excitation mode of a synchronous generator in the conditions of an industrial system of power supply complex configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2 (43), pp. 12-18. (In Russian). doi: org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18
- Sokolov A.P., Gazizova O.V., Kondrashova Y.N. Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019, 2019, p. 012033. doi:10.1088/1757-899X/666/1/012033
- Iguumeshev V.A., Malafeev A.V., Panova E.A., Varganova A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Zinoviev V.V., Yuldasheva A.I., Krubtsova A.A., Anisimova N.A., Nasibullin A.T., Tremasov M.A., Shcherbakova V.S., Bogush V.K. *Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza KATRAN 10.0* [Complex of the automated regime analysis KATRAN 10.0]. Computer program RF, no. RU 2019610251, 2019.
- Malafeev A.V., Gazizova O.V. Evaluation of the static sustainability of generators of factory power plants with parallel and separate with the energy system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy Energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2010, no. 9-10, pp. 81-91. (In Russian)
- Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Cep. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015", 2016,

- pp. 012056. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012056
27. Nikolaev N.A., Bulanova O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Yu.N., Tarasov V.M. Evaluation of the regulating effect of rectifying load to determine the parameters of the steady modes of power supply systems of industrial enterprises. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 115-118. (In Russian)
28. Gazizova O.V., Kondrashova YU.N., Malafeyev A.V. Increase of Effective Management of Modes of Electric Power Plants Due to Forecasting of Static and Dynamic Stability at Change of Network Configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 3(32), pp. 27-38. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-27-38
29. Gazizova O.V., Sokolov A.P. Research of the Effectiveness of Existing Laws of Automatic Regulation of Excitation of Synchronous Generators of Industrial Power Plants Under Various Conditions of Connection to the Electric Power System. Proceedings - 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2020. IEEE, 2020, pp. 50-55. doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234362
30. Sokolov A.P., Gazizova O.V. Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation. In the collection: 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018. IEEE, 2018. P. 8537190. doi: 10.1109/RPA.2018.8537190
31. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malafeev A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability. *Proceedia Engineering* 2015, vol. 128, pp. 759-763. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.100
32. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Yu.N. Determination of limit mode parameters to ensure successful re-synchronization of distributed generation units at iron and steel works. *Vestnik YUzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 12-22. (In Russian) doi: 10.14529/power160402

Газизова О.В. Особенности анализа статической устойчивости генераторов промышленных электростанций при выходе на раздельную с энергосистемой работу // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 3(52). С. 29-37. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-29-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-29-37)

Gazizova O.V. Static Sustainability Analysis of Generators at Industrial Power Plants Operating Separately from the Energy System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 3(52), pp. 29-37. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-29-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-29-37)