

УЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ЗАДАЧЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

О.В. Газизова¹, А.В. Варганова¹, А.В. Малафеев¹,
Н.Т. Патшин¹, А.Л. Карякин²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия,

² Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

При планировании нормальных режимов одной из задач является снижение потерь в электрической сети активной мощности на передачу реактивной при работе генераторов по электрическому графику. Снижения потерь можно достигнуть путем перераспределения реактивных мощностей, вырабатываемых генераторами. Однако реактивные мощности синхронных генераторов обуславливают их запас статической устойчивости и зависят от величины реактивных нагрузок, особенно включенных на генераторном напряжении, что ограничивает диапазон регулирования. В связи с изложенным задача определения оптимальных параметров режима генераторов для заданного диапазона реактивных нагрузок является **актуальной**. Разработан алгоритм, позволяющий определить оптимальный режим работы собственной электростанции по реактивной мощности с учетом реактивных нагрузок и запаса статической устойчивости, представляющий собой **научную новизну**. При создании алгоритма использовались **методы** последовательного эквивалентирования для расчета установившихся режимов, динамического программирования для оптимизации параметров режима и последовательного утяжеления для анализа статической устойчивости. Разработанный алгоритм положен в основу программного комплекса «КАТРАН», позволяющего произвести выбор оптимальных режимов и анализ статической устойчивости промышленных генераторов. Программный комплекс может быть **применен** при определении оптимальных режимов в крупных промышленных энергоузлах, содержащих собственные электростанции и распределенную нагрузку.

Ключевые слова: оптимальный режим, реактивная мощность, синхронный генератор, статическая устойчивость, потери мощности и электроэнергии.

Введение

В связи с увеличением доли объектов собственной генерации крупных промышленных предприятий в покрытии их суммарной нагрузки вопросы обеспечения устойчивой работы и качества электрической энергии за счет собственных мощностей становятся более актуальными. Традиционно, собственные генераторы рассматриваются как источники активной мощности. Оптимизация режимов сетей производится также по активной мощности с учетом различных критериев оптимальности: минимума затрат на топливо, потерь электроэнергии и т. д. Это оправдано тем, что оплата реактивной мощности и энергии потребителями не производится. Основными требованиями, предъявляемыми к электроэнергетическим объектам, являются надежность, экономичность и качество электрической энергии. Экономичность работы сетей, как правило, предусматривает ведение режимов, оптимальных по различным критериям. Одним из основных критериев является минимум потерь активной мощности. Поскольку эти потери в значительной мере определяются передаваемой реактивной мощностью, то экономически целесообразное ее распределение между объектами соб-

ственной генерации с целью снижения потерь является актуальным. Запас статической устойчивости синхронной машины определяет возможность работы синхронного генератора при заданной реактивной мощности. На величину выдаваемой реактивной мощности влияет величина реактивных нагрузок, подключенных к шинам генераторного напряжения. Диапазон их изменения, как правило, известен. При этом встает задача определения оптимальных параметров режима для заданного диапазона реактивных нагрузок при соблюдении ограничений по статической устойчивости. Зависимость запаса устойчивости от текущего режима определяет комплексный характер задачи.

Постановка задачи

Вопросы оптимизации параметров режима по активной мощности изложены в большом числе трудов отечественных и зарубежных ученых. Авторы [1–5] первоочередное внимание уделяют особенностям моделирования заводских тепловых электростанций с поперечными технологическими связями в задаче оптимизации режима. В [1, 2] рассмотрена реализация метода динамического программирования применительно к системам

электрообеспечения крупных промышленных предприятий, располагающих несколькими собственными электростанциями с разнородным технологическим оборудованием и сложными расходными характеристиками. Получение экономико-математических моделей турбогенераторов промышленных электростанций, работающих на нескольких видах топлива, в том числе вторичных газах металлургического производства, рассмотрено в [3–5]. Подход, предложенный в этих работах, позволяет использовать уравнения связи и целевые функции любого вида, но учет ограничений на зависимые параметры режима (токовые нагрузки элементов сети, узловое напряжение, показатели статической устойчивости и т. д.) представляет определенную сложность. Авторы [6] отмечают возрастающую важность учета режима собственных электростанций активных потребителей при планировании графика нагрузки энергосистемы и взаимодействия таких потребителей с энергообеспечивающими организациями. Математический аппарат оптимизации режимов электроэнергетических систем совершенствуется во многом в направлении использования активно-адаптивных устройств. Так, в работе [7] предложен подход, основанный на использовании дробно-полиномиальных зависимостей параметров режима от параметров схем замещения элементов системы и направленный на упрощение моделирования и повышение вычислительной эффективности в условиях задач большой размерности. Ряд работ (например, [8]) посвящен автоматическому управлению генерацией.

Исследованием вопросов устойчивости энергосистем и систем электрообеспечения также занималось большое число ученых. Вопросы анализа статической и динамической устойчивости рассмотрены в работах зарубежных ученых [9–16]. В статье [9] указывается важность устойчивости работы энергосистемы, ее классификация, характеристики, приводится ряд технических мероприятий по улучшению статической и динамической устойчивости и их экономическое обоснование в целом. Вопросы исследования нарушения устойчивости из-за внезапного увеличения мощности нагрузки изложены в [10]. Для поддержания устойчивости системы в этом случае одной из задач является определение оптимального местоположения регулятора FACTS, а также вычисление величины напряжения и угла, который будет подан в систему. Предлагается гибридный метод для определения оптимального местоположения регулятора FACTS, а также для вычисления величины напряжения и угла, который должен быть введен в систему, чтобы поддерживать стабильность системы. В работе [11] изложены вопросы повышения динамической устойчивости энергосистем с использованием статического компенсатора VAR (SVC), управляемого искусственной нейронной сетью (ANN). Вспомогательные управляющие

сигналы для SVC играют очень важную роль в смягчении электромеханических низкочастотных колебаний ротора. Регулирование параметров осуществляется на основе искусственной нейронной сети с учетом отклонения скорости генератора. В статье [12] производится анализ моментов затухания спонтанных колебаний энергосистемы, встречающиеся на очень низких частотах, с использованием линеаризованной модели малых возмущений и ее применение обобщено на многомашинные энергосистемы для динамической оценки режимной надежности. Статья [13] описывает применение программы анализа переходных процессов ETAP для моделирования энергосистем с целью анализа переходных процессов. В этом труде описывается полная имитационная модель энергосистемы с учетом паровых, газовых и гидротурбинных генераторов и протяженных линий электропередачи. Производится подробный анализ переходных процессов и статической устойчивости многомашинной системы при наличии и отсутствии систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов. В работе [14] описывается интеллектуальная система (IS), использующая синхронные векторные измерения для оценки устойчивости переходных процессов (TSA). Для TSA после нарушения одной из основных проблем является время отклика, которое в литературе приводится как фиксированное значение в диапазоне до 3 с после устранения неисправности. В этой статье разработана новая IS, чтобы сбалансировать требования к скорости и точности отклика. Автоадаптивный механизм принятия решений TSA предназначен для постепенной регулировки времени отклика, так что IS может выполнять классификацию быстрее, тем самым оставляя больше времени для аварийного контроля. В статье [15] исследуется детальный гибкий подход для включения различных гибких регуляторов систем передачи переменного тока (FACTS) в среду с многомашинной системой электропитания для улучшения устойчивости энергосистемы. Целью данной статьи является разработка общей методологии модели энергосистемы DAE с включением последовательных и шунтирующих регуляторов FACTS в индивидуальном и скоординированном режиме управления для улучшения устойчивости многомашинной энергосистемы. Статья [16] посвящена вращающемуся конденсатору с регулируемой скоростью, способному регулировать не только реактивную, но и активную мощность, что обеспечивает повышение устойчивости энергосистемы. Таким образом, исследование зарубежных ученых, направленные на повышение как статической, так и динамической устойчивости преимущественно с использованием дополнительных регулирующих устройств, не учитывают возможной оптимизации загрузки источников по реактивной мощности и ориентиро-

вания на крупные энергосистемы, работающие с электрически удаленной нагрузкой.

Среди отечественных ученых такие вопросы также неоднократно изучались [17–22]. Вопросы анализа статической устойчивости синхронных генераторов в электроэнергетических системах с учетом статических характеристик нагрузки изложены в трудах [17, 22]. Анализ статической и динамической устойчивости генераторов местных электростанций, в том числе возможности выхода на раздельную работу и последующей ресинхронизации, посвящены труды [18, 19, 21]. В данных работах для анализа устойчивости промышленных генераторов используется программный комплекс «КАТРАН», в основу которого положены методы последовательного эквивалентирования, динамического программирования, последовательного утяжеления и последовательных интервалов.

Как показывает обзор, реализация желаемых режимов возможна при комплексном подходе к вопросам планирования режимов и неизбежно требует коррекции законов автоматического регулирования возбуждения.

В рамках данной работы предполагается определение оптимальных реактивных мощностей промышленных синхронных генераторов в условиях изменяющихся реактивных нагрузок на генераторном напряжении, работы генераторов по электрическому графику, обеспечения минимума потерь при необходимом запасе статической устойчивости.

Теоретическая часть

В связи с изложенным в настоящее время возникает ряд вопросов, связанных с управлением потоками реактивной мощности в промышленных узлах сложной конфигурации, имеющих большое количество собственных источников электроэнергии. Один из таких вопросов – оптимальное распределение потоков реактивной мощности по критерию минимума затрат на потери активной мощности за счет передачи реактивной – связан с экономичностью энергохозяйства предприятия. Для решения задачи оптимального распределения активной и реактивной мощности между источниками электроэнергии предлагается использовать метод динамического программирования в сочетании с методом последовательного эквивалентирования [1, 2]. При решении задачи оптимизации должны учитываться ограничения в форме равенств, определяющих баланс активной мощности в системе электроснабжения, и ограничения в форме неравенств, отражающих располагаемую мощность агрегатов.

Разработан алгоритм (рис. 1), позволяющий определить оптимальный режим работы собственной электростанции по реактивной мощности. Для расчета установившегося режима применен модифицированный метод последовательного эквива-

лентирования, позволяющий в сочетании с методом динамического программирования в прямом ходе определить набор оптимальных решений задачи распределения реактивных мощностей в пределах располагаемой мощности генерирующих источников. Условия связи с энергосистемой задаются на границе раздела и обеспечивают выполнение балансовых условий, а следовательно, и выбор единственного оптимального решения. Преимущество использования последовательного эквивалентирования заключается в том, что в соответствии с принципом оптимальности на каждом шаге эквивалентирования определяется оптимальный план решения только между двумя переменными, что значительно сокращает объем вычислений.

В общем виде задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: найти минимум целевой функции:

$$F = \sum_{i=1}^n 3_i(Q_i) \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max}; \\ \sum Q_i - \sum q_j = Q_{\text{вх}}. \end{cases} \quad (2)$$

Для оценки режима по показателям статической устойчивости необходим также учет ограничений по активной мощности:

$$\begin{cases} P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max}; \\ \sum P_i - \sum p_j = P_{\text{вх}}. \end{cases} \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) P_i , Q_i – активная и реактивная мощности генератора i ; $P_{\text{вх}}$, $Q_{\text{вх}}$ – входная активная и реактивная мощности связи с энергосистемой; p_j , q_j – активная и реактивная мощности нагрузки.

Учитывая разнообразный характер технико-экономических характеристик генераторов, желательно применять алгоритм, позволяющий использовать функции затрат любого вида, которые могут иметь нелинейности, разрывы и другие свойства, а также могут быть заданы табличными числовыми значениями [3, 4].

Функция (1) представляет собой стоимость активных потерь, обусловленных выработкой реактивной мощности, и имеет вид квадратичной зависимости:

$$3_i(Q_i) = C_i(a_i Q_i^2 + b_i Q_i), \quad (4)$$

где a_i , b_i – коэффициенты, учитывающие технические данные машины и ее системы возбуждения; C_i – стоимость единицы потерь активной мощности.

Функция (4) должна быть представлена в виде табличной зависимости с выбранным шагом с учетом максимально возможной и минимально возможной величины реактивной нагрузки генератора.

В условиях заводских электрических сетей 110–220 кВ малой протяженности вводится допущение, что все генераторы являются подключенными к одному узлу. Получение эквивалентной

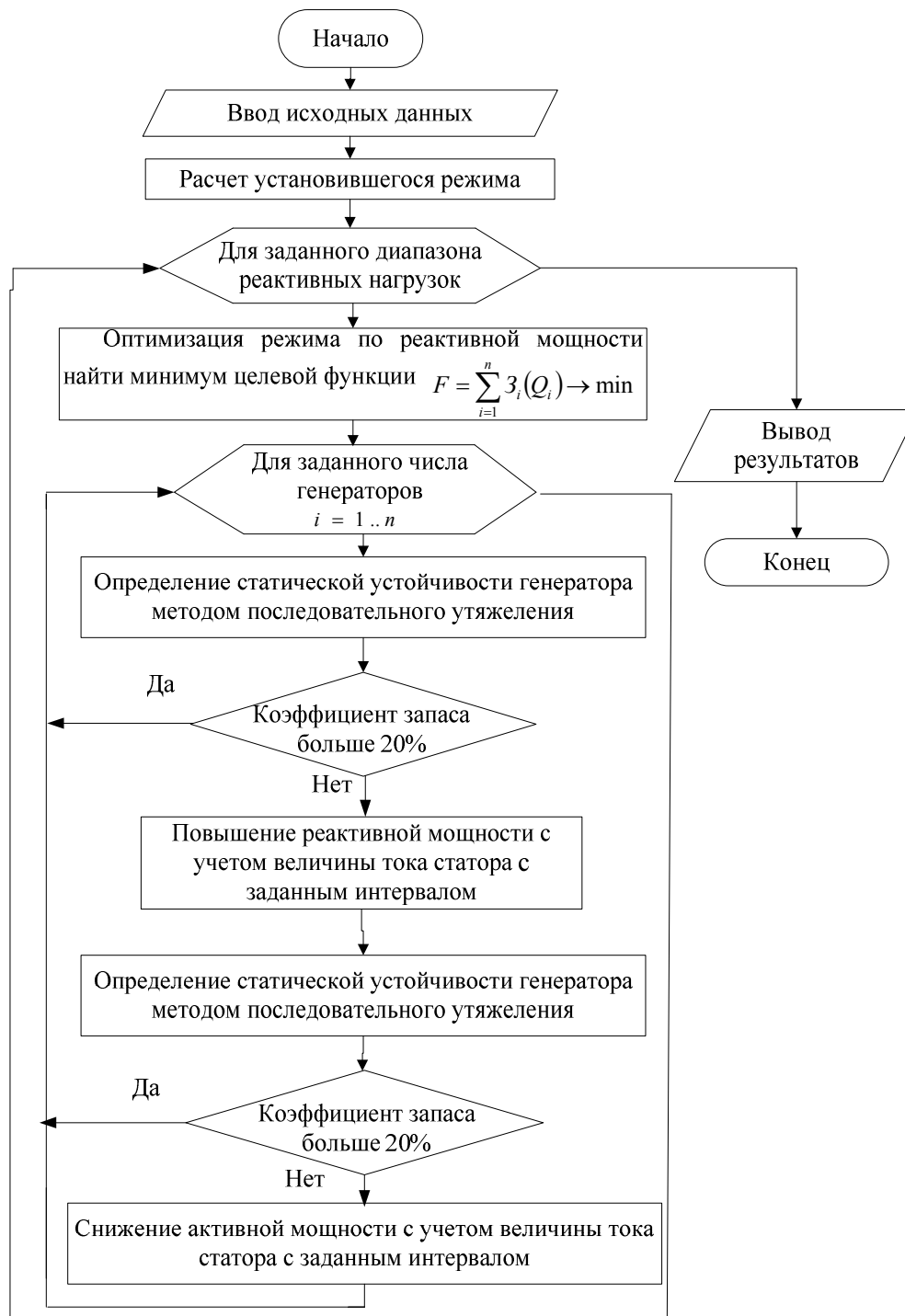


Рис. 1. Алгоритм, позволяющий определить оптимальный режим работы собственной электростанции по реактивной мощности

характеристики на прямом ходе и оптимальной загрузки каждого из генераторов на обратном ходе производится согласно алгоритму, приведенному в [1].

Оптимизация генераторов по реактивной мощности дает совокупность значений реактивных мощностей источников питания в сети. Однако особенностью ограничений (2) и (3) является их зависимость не только от паспортных характери-

стик генераторов, но и от параметров режима. Следовательно, по результатам оптимизации должны быть произведены дополнительные исследования совокупности полученных выдаваемых реактивных мощностей в плане анализа статической устойчивости машин и оценки допустимости оптимального режима.

В связи с тем, что особенностью заводских систем электроснабжения являются частые рекон-

струкции и изменения конфигурации, на среднесрочном горизонте планирования необходимо рассматривать несколько вариантов подключения потребителей реактивной мощности и величин их нагрузок. Для каждого выбранного варианта в сложносвязанной сети предполагается выявить оптимальный режим и исследовать статическую устойчивость генераторов с помощью метода последовательного утяжеления. При его применении в условиях параллельной работы с энергосистемой последовательно увеличиваются собственные углы роторов каждого из синхронных генераторов и определяется выдаваемая ими мощность. Максимальное значение мощности определяет предельную загрузку генератора по условию существования режима. В случае недостаточной величины коэффициента запаса необходимо повысить реактивную мощность с учетом допустимой величины тока статора и нагрузочной диаграммы машины. Если и при этом коэффициент запаса устойчивости не достаточен, предполагается снижение загрузки генератора по активной мощности с выбранным шагом. Разработанный программный комплекс «КАТРАН» позволяет произвести выбор оптимальных режимов и анализ статической устойчивости промышленных генераторов.

Результаты экспериментальных исследований

Исследования по предложенному алгоритму определения реактивных мощностей проводились на примере промышленного энергетического узла,

в составе которого имеется три собственные электростанции суммарной установленной мощностью более 600 МВт. Схема исследуемого энергоузла приведена на рис. 2. Определение реактивной мощности с учетом потерь производилось для всех генераторов электростанций. В качестве примера выбрана электростанция ТЭЦ-1, схема электрических соединений которой приведена на рис. 3. Особенностью электростанции является значительная доля нагрузки на генераторном напряжении, а также разнородное оборудование с диапазоном установленных мощностей генераторов от 6 МВт до 50 МВт. Электростанция имеет две точки выдачи мощности (ПС 30 и ПС 60, рис. 2). Запас статической устойчивости генераторов исследуемой электростанции обусловлен мощностью короткого замыкания в точках связи с энергосистемой (связи с ПС «Бекетово», ПС «Шагол» и Ириклинской ГРЭС) и эквивалентными сопротивлениями связи между генераторами и энергосистемой.

Как видно из рис. 3, подключение новых потребителей возможно на напряжениях 3, 10 и 110 кВ. В качестве примера производилось увеличение реактивной нагрузки на шинах ТЭЦ-3, что равносильно повышению нагрузки ТЭЦ-1 на шинах 110 кВ. В ходе вычислительного эксперимента при неизменных заданных активных мощностях генераторов и нагрузок изменялись реактивные мощности узла с заданным интервалом. На основании разработанного алгоритма получены оптимальные загрузки генераторов по реактивной мощности рассматриваемого объекта.

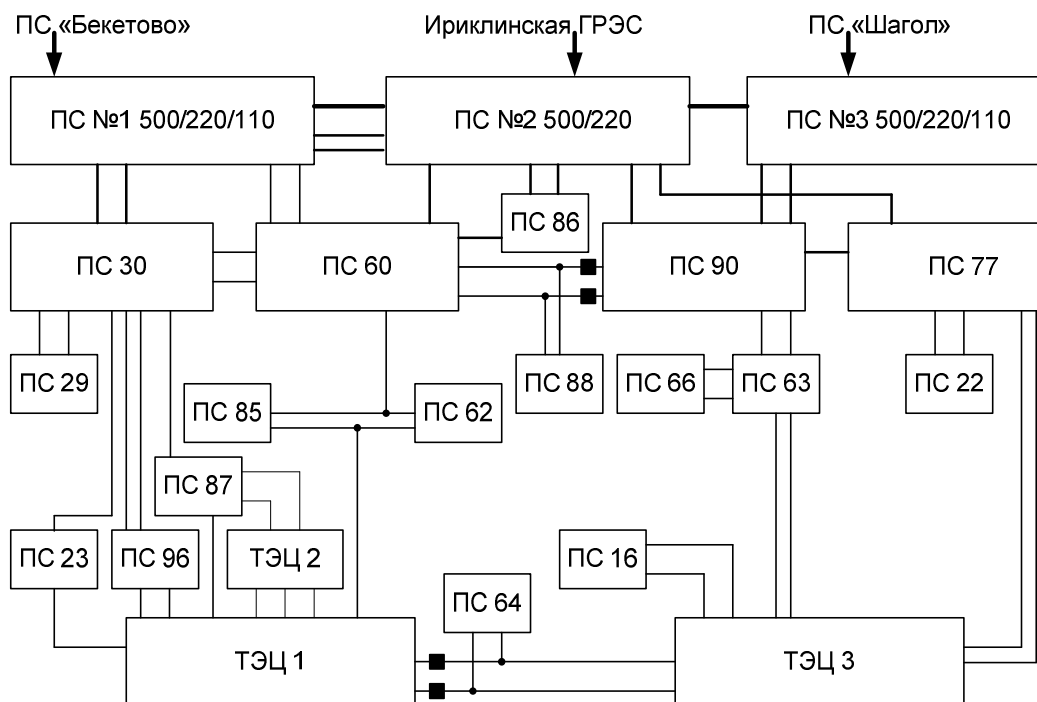


Рис. 2. Схема исследуемого энергоузла

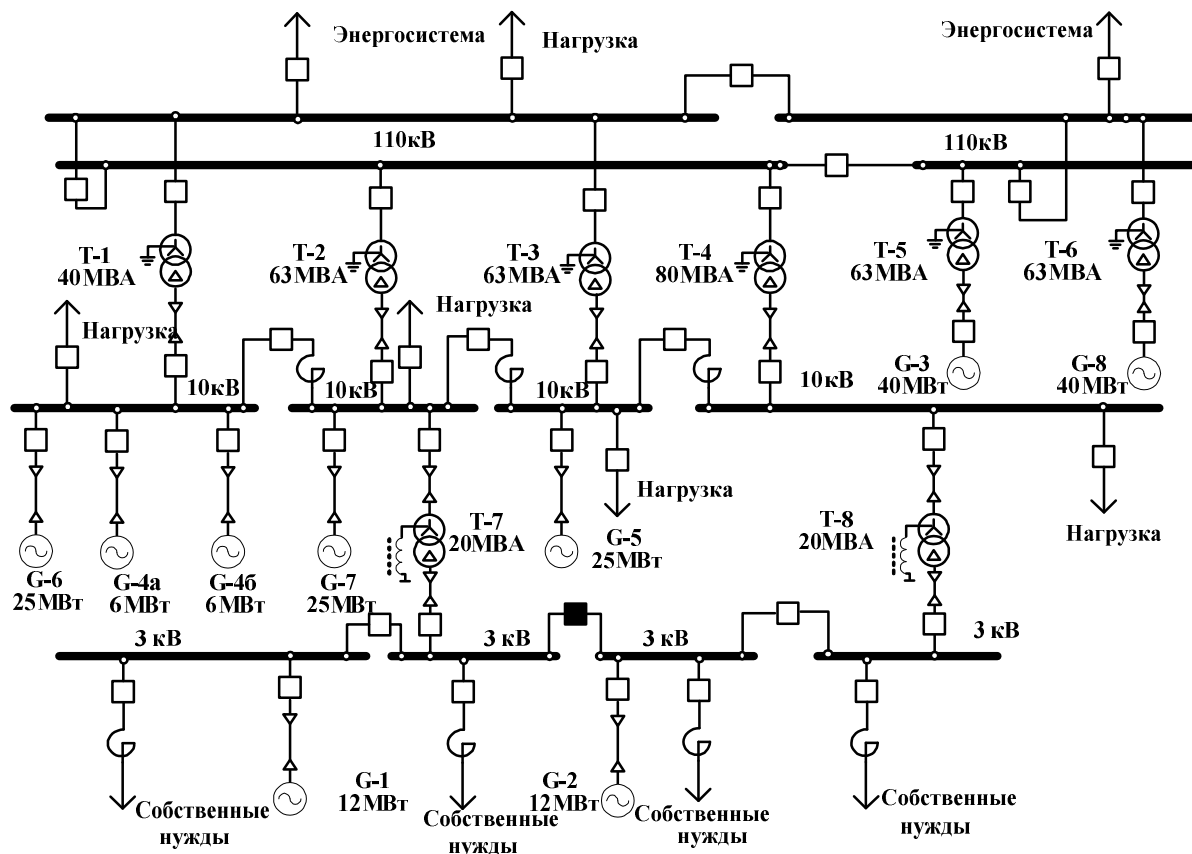


Рис. 3. Исследуемая схема электрических соединений ТЭЦ-1

На рис. 4 и 5 показаны зависимости для наиболее экономичного (G-8) и для наименее экономичного генератора (G-6). По оси абсцисс показана суммарная реактивная нагрузка узла, показанного на рис. 2, по оси ординат – оптимальная выработка реактивной мощности соответствующего генератора. Как видно из рис. 4 и 5, выработка

реактивной мощности генератором G-8 более экономична, поскольку его целесообразно загружать уже при наименьшем суммарном потреблении реактивной мощности узлом.

Поскольку нагрузка увеличивалась на шинах различного напряжения электростанции ТЭЦ-3, то есть вне района исследуемой ТЭЦ-1, то экономич-

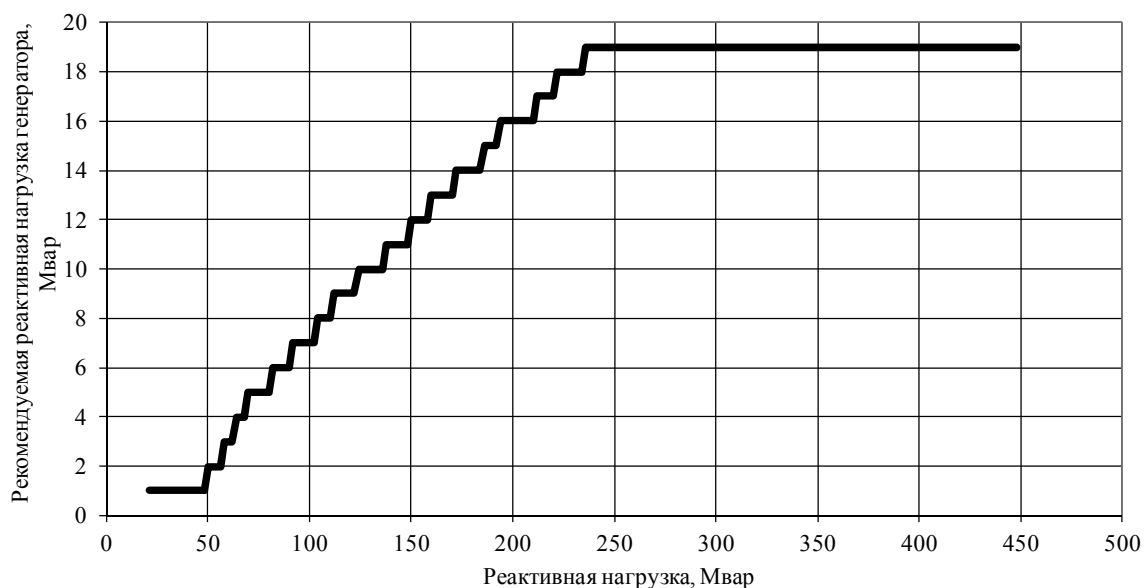


Рис. 4. Оптимальная загрузка генератора G-8

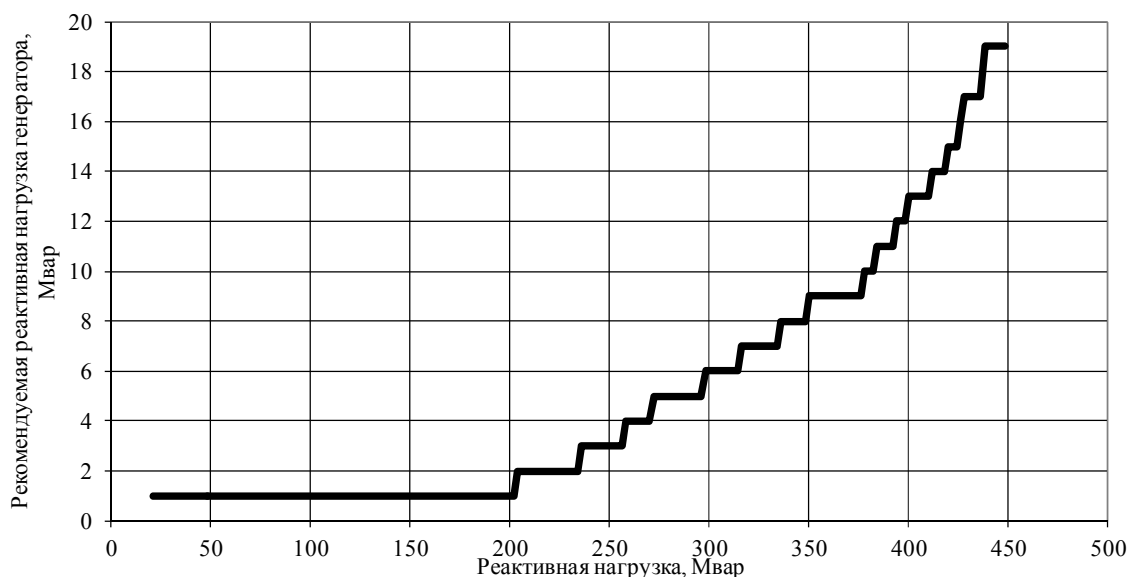


Рис. 5. Оптимальная загрузка генератора G-6

**Влияние загрузки по активной мощности синхронного генератора
на коэффициент запаса статической устойчивости**

G-6, $P_{ном} = 25$ МВт, $P_{текущ} = 27$ МВт, $Q_{текущ} = 8$ Мвар, $Q_{доп} = 16$ Мвар			G-8, $P_{ном} = 40$ МВт, $P_{текущ} = 42$ МВт, $Q_{текущ} = 15$ Мвар, $Q_{доп} = 26$ Мвар		
$Q_{оптимальн}$, Мвар	$P_{предельн}$, МВт	Коэффициент запаса, %	$Q_{оптимальн}$, Мвар	$P_{предельн}$, МВт	Коэффициент запаса, %
4	45	67	4	72	71
8	47	74	8	73	74
12	48	78	12	74,5	78
16	50	85	16	76	81
20	51	89	20	77,5	85

нее грузить по мере роста реактивной нагрузки генератор G-8 как наиболее электрически близкий к энергосистеме, а затем генератор G-6. Полученные значения реактивных мощностей были проанализированы по запасу статической устойчивости. Для выбранных генераторов был определен коэффициент запаса статической устойчивости. Результаты расчета сведены в таблицу.

Как видно из полученных данных, достаточный запас статической устойчивости сохраняется. Однако при превышении 16 Мвар (для G-6) и 26 Мвар (для G-8) происходит перегрузка по току статора. Поэтому полученные рекомендованные реактивные мощности должны проверяться по ряду параметров, в том числе по коэффициенту запаса статической устойчивости, допустимому току обмотки статора и нагрузочной диаграмме синхронной машины. Решением является коррекция уставок регулятора возбуждения по предельным значениям реактивной мощности.

Заключение

Расширение промышленными предприятиями собственных источников генерации приводит к существенному усложнению вопросов управления

нормальными режимами. В силу приближения нагрузок к генераторам повышается возможность питания потребителей реактивной мощностью непосредственно от шин последних. С целью повышения энергоэффективности функционирования системы электроснабжения встает вопрос оптимального распределения реактивных мощностей между собственными источниками питания.

На основе метода динамического программирования разработан алгоритм определения оптимальной загрузки генераторов по реактивной мощности по критерию минимума затрат на выработку и передачу реактивной мощности, положенный в основу одного из модулей программного комплекса расчета режимов «КАТРАН». Данный алгоритм апробирован на примере крупного энергетического узла, имеющего в своем составе три местные электростанции. При увеличении реактивной мощности нагрузки на шинах одной из электростанций получена оптимальная загрузка всех генераторов.

Разработанный алгоритм отличается от существующих возможностью учета при оптимизации режима статической устойчивости машин и распределения нагрузок в системе электроснабжения.

Для оценки статической устойчивости предложено использование метода последовательного утяжеления, позволяющего судить о сохранении устойчивости без непосредственного определения корней характеристического уравнения. Разработанный программный комплекс и алгоритм могут быть использованы для планирования нормальных режимов промышленных систем электроснабжения, имеющих источники распределенной генерации и существенные реактивные нагрузки на генераторном напряжении.

Литература

1. Оптимизация установившихся режимов промышленных систем электроснабжения с разнородными генерирующими источниками при решении задач среднесрочного планирования / А.В. Малафеев, А.В. Кочкина, В.А. Игуменцев и др. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 112 с.
2. Кочкина, А.В. Применение метода динамического программирования для решения задач оптимального распределения активных мощностей между разнородными генерирующими источниками собственных электростанций предприятий черной металлургии / А.В. Кочкина // Наука и производство Урала. – 2012. – № 8. – С. 204–209.
3. Построение технико-экономических моделей турбогенераторов и котлоагрегатов собственных электростанций промышленных предприятий / А.В. Кочкина, А.В. Малафеев, Н.А. Курилова, Р.П. Нетунский // Электротехнические системы и комплексы. – 2013. – № 21. – С. 247–252.
4. Малафеев, А.В. Получение экономико-математических моделей турбогенераторов промышленных электростанций с целью оптимизации режима системы электроснабжения / А.В. Малафеев, В.А. Игуменцев, А.В. Хламова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009. – № 4. – С. 34–38.
5. Варганова, А.В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей / А.В. Варганова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 76–85. DOI: 10.14529/power170309
6. Айзенберг, Н.И. Координация взаимодействия энергоснабжающей организации и активных потребителей при оптимизации суточных графиков нагрузки / Н.И. Айзенберг, Е.В. Сташкевич, Н.И. Воропай // Изв. РАН. Энергетика. – 2016. – № 3. – С. 15–25.
7. Исследование методов оптимизации режимов работы энергосистем / Н.А. Беляев, Н.В. Коровкин, О.В. Фролов, В.С. Чудный // Электротехника. – 2013. – № 2. – С. 21–29.
8. Zhang, G. An AGC dynamics-constrained economic dispatch model / G. Zhang, J. McCalley, Q. Wang // IEEE Transactions on Power Systems. – 2019. – Vol. 34, no. 5. – P. 3931–3940. DOI: 10.1109/tpwrs.2019.2908988
9. Xiufeng, Shi. Research on Measures to Improve Stability of the Power System / Shi Xiufeng, Mu Shiguang // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 742. – P. 648–652. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.742.648
10. Satheesh, A. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN / A. Satheesh, T. Manigandan // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2013. – Vol. 49, iss. 1. – P. 38–47.
11. Harikrishna, D. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator / D. Harikrishna, N.V. Srikanth // TELKOMNIKA. – 2012. – Vol. 10, no. 1. – P. 9–16.
12. Boudour, Mohamed. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique / Mohamed Boudour, Abdelhafid Hellal // The Arabian Journal for Science and Engineering. – 2005. – Vol. 30. – Number 1B.
13. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC / Er.S. Sujatha, Dr.R. Anitha, Dr.P. Selvan, Er.S. Selvakumar // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2014. – Vol. 63, iss. 1. – P. 85–91.
14. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system / Rui Zhang, Yan Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po Wong // The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib. – 2015. – Vol. 9, iss. 3. – P. 296–305.
15. 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. – P. 276–291.
16. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization / Hirofumi Akagi, Kenji Takahashi, Toshiaki Kobayashi et al. // Electrical Engineering in Japan. – 2000. – Vol. 133, no. 1. – DOI: 10.1002/1520-6416(200010)133:1<31::aid-eej4>3.0.co;2-a
17. Жданов, П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
18. Газизова, О.В. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии / О.В. Газизова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 12–22. DOI: 10.14529/power160402
19. Газизова, О.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при

изменении конфигурации сети / О.В. Газизова, Ю.Н. Кондрашова, А.В. Малафеев // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2016. – № 3 (32). – С. 27–38. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-27-38

20. Малафеев, А.В. Исследование влияния автоматических регуляторов промышленных генераторов на параметры переходных процессов коротких замыканий и выхода на отдельную работу / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Кондрашова // *Главный энергетик*. – 2011. – № 3. – С. 26–29.

21. Kondrashova, Y.N. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability / Y.N. Kondra-

shova, O.V. Gazizova, A.V. Malapheev // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – P. 759–763. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.100

22. Gazizova, O.V. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management. / O.V. Gazizova, A.V. Malafeyev, Y.N. Kondrashova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015*. – 2016. – P. 012056. DOI: 10.1088/1757-899x/124/1/012056

Газизова Ольга Викторовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; logan_b_7@mail.ru.

Варганова Александра Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; aleksandra-khlamova@yandex.ru.

Малафеев Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; malapheev_av@mail.ru.

Патшин Николай Трофимович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; patshin2016@yandex.ru.

Карякин Александр Ливневич, д-р техн. наук, старший науч. сотрудник, заведующий кафедрой «Электрификация горных предприятий», Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; karyakin.a@ursmu.ru.

Поступила в редакцию 14 марта 2019 г.

DOI: 10.14529/power190303

TAKING INTO ACCOUNT STATIC STABILITY OF SYNCHRONOUS GENERATORS WHEN PLANNING OPTIMIZING IN-HOUSE POWER PLANTS BY REACTIVE POWER

O.V. Gazizova¹, logan_b_7@mail.ru,
A.V. Varganova¹, aleksandra-khlamova@yandex.ru,
A.V. Malafeev¹, malapheev_av@mail.ru,
N.T. Patshin¹, patshin2016@yandex.ru,
A.L. Karyakin², karyakin.a@ursmu.ru

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

² Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

One problem concerning the design of normal operation is to reduce losses in the active power grid induced by reactive power transmission when generators are running as scheduled. Loss can be reduced by redistributing the reactive power generated by the generators. However, the reactive power of synchronous generators determines their static stability margin and depends on the reactive loads, especially those running at the generator voltage, which limits the control range. This is why it is **imperative** to optimize the generator configurations for a given range of reactive loads. An algorithm has been developed to optimize in-house power plants by reactive

power, which takes into account the reactive loads and the margin of static stability. This is where the **novelty of this research** lies. When creating the algorithm, sequential equivalentization methods were used to calculate steady-state parameters, to program the parametric optimization, and to perform sequential weighting for static stability analysis. The developed algorithm is the basis of the KATRAN software suit, which can be used to optimize the parameters and analyze the static stability of industrial generators. The software can be used for the optimization of large industrial power centers containing in-house power plants and carrying distributed load.

Keywords: optimal parameters, reactive power, synchronous generator, static stability, loss of power and electricity.

References

1. Malafeev A.V., Kochkina A.V., Igumenshev V.A., Varganov D.E., Kovalev A.D. *Optimizatsiya ustano-vivshikhsya rezhimov promyshlennykh sistem elektrosnabzheniya s raznorodnymi generiruyushchimi istochnikami pri reshenii zadach srednesrochnogo planirovaniya* [Optimizing the Steady State of a Power System With Diverse Generators for Mid-Term Scheduling]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013. 112 p.
2. Kochkina A.V. [Application of Dynamic Programming for Solving Optimum Distribution of Power Between the Heterogeneity of Its Own Power Generation Source of Ferrous]. *Science and Production of Ural*, 2012, no. 8, pp. 204–209. (in Russ.)
3. Kochkina A.V., Malafeev A.V., Kurilova N.A., Netupsky R.P. [Turbo-Generator and Boiler Techno-Economic Models Obtaining of Industrial Power Plant]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electro-technical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 247–252. (in Russ.)
4. Malafeev A.V., Igumenshev V.A., Khlamova A.V. [Obtaining Economic and Mathematical Models of Turbogenerators of Industrial Power Plants in Order to Optimize the Parameters of the Power Supply System]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electrical Complexes and Control Systems], 2009. no. 4, pp. 34–38. (in Russ.)
5. Varganova A.V. [About Optimization Methods of Power Supply System and Network Modes] *Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 76–85. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170309
6. Aizenberg N.I., Stashkevich E.V., Voropay N.I. [Coordinating the Power Supplier and the Active Consumer to Optimize Daily Load Schedule]. *Izv. RAS. Energy* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2016, no. 3, pp. 15–25. (in Russ.)
7. Belyaev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudny V.S. [The study of Methods for Optimizing the Operating Parameters of Energy Systems]. *Electrical Engineering*, 2013, no. 2, pp. 21–29. (in Russ.)
8. Zhang G., McCalley J., Wang Q. An AGC Dynamics-Constrained Economic Dispatch Model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, vol. 34, no. 5, pp. 3931–3940. DOI: 10.1109/tpwrs.2019.2908988
9. Xiufeng Shi, Shiguang Mu. 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
10. Sathesh 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.
11. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. *TELKOMNIKA*, 2012, vol. 10, no. 1, pp. 9–16.
12. Mohamed Boudour, Abdelhafid Hellal. Mohamed Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2005, vol. 30, number 1B.
13. Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 85–91.
14. Rui Zhang, Yan Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po Wong. Post-Disturbance Transient Stability Assessment of Power Systems by a Self-Adaptive Intelligent System. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 296–305.
15. 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, pp. 276–291.
16. Hirofumi Akagi, Kenji Takahashi, Toshiaki Kobayashi, Hiroaki Sugihara, Takaaki Kai. Hirofumi Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. *Electrical Engineering in Japan*, 2000, vol. 133, no. 1. DOI: 10.1002/1520-6416(200010)133:1<31::aid-eej4>3.0.co;2-a
17. Zhdanov, P.S. *Voprosy ustojchivosti jenergeticheskikh sistem* [Questions of Stability of Power Systems]. Moscow, Energiya, 1979. 456 p.

18. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Yu.N. Determination of Limit Mode Parameters to Ensure Successful Resynchronization of Distributed Generation Units at Iron and Steel Works. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 12–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160402

19. 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. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2016, no. 3 (32), pp. 27–38. (in Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-27-38

20. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova YU.N. How Automatic Controllers of Industrial Generators Affect the Transients and Short Circuits and the Transition to Isolated Operation. *Chief Power Engineer*, 2011, no. 3, pp. 26–29. (in Russ.)

21. 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. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 759–763. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.100

22. 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. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015*, 2016, p. 012056. DOI: 10.1088/1757-899x/124/1/012056

Received 14 March 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Учет статической устойчивости синхронных генераторов в задаче планирования оптимальных режимов собственных электростанций по реактивной мощности / О.В. Газизова, А.В. Варганова, А.В. Малафеев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 23–33. DOI: 10.14529/power190303

FOR CITATION

Gazizova O.V., Varganova A.V., Malafeev A.V., Patshin N.T., Karyakin A.L. Taking into Account Static Stability of Synchronous Generators when Planning Optimizing In-House Power Plants by Reactive Power. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 23–33. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190303