

# Исследования запаса статической устойчивости ЭТС с собственной генерацией в составе комплекса очистных сооружений\*

Пупин В.М.

ООО «НПК Промир»  
г. Москва, Российская Федерация  
[vpupin@npkpromir.com](mailto:vpupin@npkpromir.com)

Закутнов В.А.

г. Москва, Российская Федерация  
[zakutnv@rambler.ru](mailto:zakutnv@rambler.ru)

Фёдоров О.В.

Нижегородский государственный  
технический университет им. Р.Е. Алексеева  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
[fov52@mail.ru](mailto:fov52@mail.ru)

**Аннотация.** Применение собственных источников электроэнергии на производстве увеличивается, в этой связи возникает задача обеспечения условий совместной работы автономных и централизованных источников питания систем электроснабжения производств. Приведена математическая модель и критерий расчета статической устойчивости систем электроснабжения с автономными и централизованными источниками и замкнутой структурой электрических сетей. Методика расчета параметров статической устойчивости ЭТС с комбинированным составом источников доведена до программы STAT100. Разработана математическая модель электротехнической системы с централизованными и автономным многоагрегатным источником питания, позволяющая моделировать режимы ЭТС при наличии замкнутых контуров в системе внутреннего электроснабжения с контролем углов ЭДС генераторов, синхронных (СД) и асинхронных двигателей (АД) относительно ЭДС балансирующего узла, что позволяет повысить точность расчетов показателей устойчивости ЭТС. Выполнены расчеты статической устойчивости ЭТС совместно с мини-ТЭС при возможном отключении одного питающего трансформатора, от одного до четырех генераторов, а также при изменении состава подключенной нагрузки, а также типа возбудительного устройства СД.

Расчетные исследования подтвердили, что запас статической устойчивости в исходном режиме для всех секций ТП соответствует требованиям ГОСТ по устойчивости энергосистем. В режиме при отключении одного генератора мини-ТЭС он более 16%, при выводе в ремонт трансформатора снижается еще на 9%, а при отключении 3-х генераторов станет меньше требуемой величины для послеаварийного режима согласно ГОСТ по устойчивости энергосистем для нескольких ТП.

**Ключевые слова:** генератор, замкнутый контур, моделирование, электротехнический комплекс очистных сооружений, синхронный двигатель, установившийся режим, система электроснабжения.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия прогресс в развитии сооружений очистки сточных вод, обработки осадка, утилизации бытового мусора во всем мире тесно связан с ресурсосбережением, повышением эффективности и надежности энергоснабжения таких объектов [6, 7, 9]. Поэтому в составе очистных сооружений в Европе, а затем и России стали появляться мини-станции [1, 4, 14]. Схемы построения электротехнических систем (ЭТС) очистных сооружений могут содержать от двух до десяти генераторов

собственных нужд (суммарной мощностью от 10 до 25 МВт), подключенных как к сетям среднего (6,10 кВ), так и низкого (до 1 кВ) напряжения. При проектировании, эксплуатации мини-станции на очистных сооружениях актуальны задачи выбора напряжения, расчета статической и динамической устойчивости ЭТС (особенно при росте ввода квадратных метров жилья) [2, 3, 8, 9, 17].

При выборе принципа построения мини-ТЭС сравнивают расход топлив и эксплуатационные затраты газотурбинной (ГТУ) и газо-поршневой установок (ГПУ) (табл. 1) [1, 9, 18, 24]. Газопоршневые двигатели в диапазоне мощности до 4 МВт имеют более высокий КПД по сравнению с газовыми турбинами, приспособлены для работы на частичных нагрузках. Кроме того, они менее подвержены влиянию высокой температуры окружающего воздуха, и их ресурс в 2-3 раза больше, чем у газовых турбин.

Таблица 1

Показатель	Газопоршневой привод	Газотурбинный привод
Ремонтпригодность	ремонт производится на месте и требует меньше времени	ремонт производится на специальных заводах
Экономичность	КПД мало меняется при нагрузке от 100% до 50% мощности	КПД резко снижается на частичных нагрузках
Удельный расход топлива при 100% и 50% нагрузках	9,3...11,6 МДж/кВт·ч 0,264...0,329 м3/кВт·ч	13,2...17,7 МДж/кВт·ч 0,375...0,503 м3/кВт·ч
Падение напряжения и время восстановления после 50% наброса нагрузки	22% 8 с	40% 38 с
Влияние переменной нагрузки	не желательна долгая работа на нагрузках менее 40% (сильно влияет на интервалы обслуживания)	работа на частичных нагрузках (менее 50%) не влияет на состояние турбины
Обслуживание	останов после 1000-2000 ч. работы	останов после каждых 2000 ч.

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

Рассматриваемая нами мини-ТЭС имеет электроснабжение от энергосистемы и собственной генерации (рис. 1). От данных ТП-1, ТП-15 запитаны основные потребители – турбовоздуходувные агрегаты с электродвигателями: ТП-15 – ДСП-116-49-4 мощностью 1300кВт -9 шт., СТД 1250-2 мощностью 1250кВт-7 шт.; ТП-1 –АТМ 1200-2 мощностью 1200кВт – 4 шт., СТМ мощностью 1500-2 1500кВт – 6 шт. [9, 12].

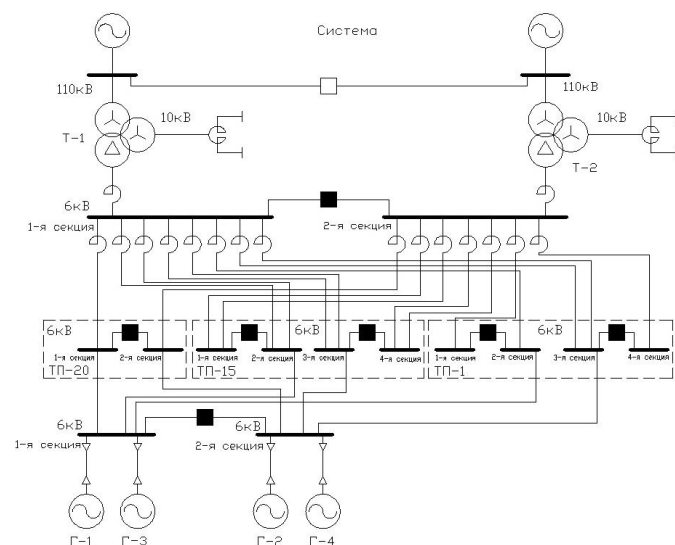


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема электроснабжения ЭТС очистных сооружений

Для исследования СЭС эффективным и удобным является метод математического моделирования с использованием вычислительных машин, который дает возможность исследовать с высокой точностью широкий круг задач, решение которых экспериментальным путем обходится большими материальными затратами или вообще невозможно [7, 8, 20, 22]. Для оценки статической устойчивости подстанций, от которых запитаны синхронные и асинхронные двигатели, математическая модель должна учитывать взаимное влияние двигателей, параметры электрической сети, узлов нагрузки и использовать численные методы решения [2, 8, 10, 11, 19, 21]. Математические модели должны отражать реальные электромагнитные и электромеханические процессы СД, учитывать работу систем возбуждения СД [3, 8, 12], влияния СЭС.

Механизмы, приводимые СД, являются технологически ответственными, к ним предъявляются высокие требования к надежной работе в стационарных и в переходных режимах [1, 4, 8, 20].

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭТС ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ПОДКЛЮЧЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для определения условий нарушения статической устойчивости СПЭ очистных сооружений с мини-ТЭС предложен критерий  $dE_c/dU_y > 0$ , т.е. постепенное снижение напряжения до величины, при которой происходит нарушение статической устойчивости электродвигательной нагрузки. Расчеты статической устойчивости по этому критерию алгоритмически проще,

нет необходимости в расчетах частных производных режимных параметров:

$$a_0 = \prod_{i=1}^n \frac{dP_{CD,i}}{d\Theta_i} \prod_{j=1}^m \frac{dP_{AD,j}}{ds_{AD,j}} \prod_{i=1}^n \frac{dU_{y,k}}{dU_{B,CD,i}} \prod_{j=1}^m \frac{dU_{y,k}}{dU_{B,AD,j}} \prod_{k=1}^{n_y} \frac{dE_c}{dU_y}$$

где:  $P_{CD,i}$  ( $P_{AD,i}$ ) – активная мощность  $i$ -го синхронного (асинхронного) электродвигателя ЭТС ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ. Для расчета статической устойчивости ЭТС очистных сооружений предложенный критерий реализован в виде программы STAT100. При оценке динамической устойчивости ЭТС с собственной генерацией анализируется кривая угла нагрузки  $\delta(t)$  синхронного генератора и двигателя, а также выявляются факты опрокидывания асинхронных электродвигателей и выхода из синхронизма СД.

Расчет параметров установившегося режима электрических двигателей и узлов нагрузки предлагается выполнить на основе уравнений узловых напряжений [12]:

- для первого уровня (от электрической системы до узлов нагрузки согласно рис. 2):

$$\underline{U}_y = \underline{E}_c - \underline{Z}_y \cdot \underline{J}_y \quad (1)$$

- для второго уровня (от узлов нагрузки до выводов секций, СД и АД):

$$\underline{J}_y = \underline{J}_{TP} + \underline{\Sigma} \underline{J}_{CD} + \underline{\Sigma} \underline{J}_{AD} + \underline{J}_{BK}; \quad (2)$$

$$\underline{U}_{BCD} = \underline{U}_y - \underline{Z}_{BCD} \underline{J}_{CD}; \quad (3)$$

$$\underline{U}_{BAD} = \underline{U}_y - \underline{Z}_{BAD} \underline{J}_{AD}; \quad (4)$$

- для третьего уровня (для синхронных и асинхронных двигателей):

$$\underline{J}_{CD} = \frac{P_{CD} - jQ_{CD}}{|U_{CD}|^2} \underline{U}_{CD}; \quad (5)$$

$$\underline{J}_{AD} = \frac{P_{AD} + jQ_{AD}}{|U_{AD}|^2} \underline{U}_{AD}. \quad (6)$$

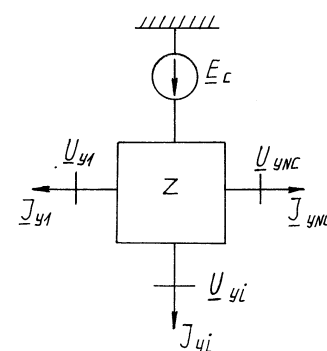


Рис. 2. Схема замещения первого уровня системы промышленного электроснабжения

В качестве исходных данных для расчета установившегося режима СЭС приняты:  $U_{OH}$  – исходное (номинальное) напряжение на первой секции в исходном режиме;  $K_{3i}$  и  $K_{3Aj}$  – коэффициенты загрузки  $i$ -го синхронного и  $j$ -го асинхронного двигателей ( $i = 1, N_{CD}$ ;  $j = 1, N_{AD}$ );  $\cos \phi_i$  – коэффициент мощности  $i$ -го СД в исходном режиме ( $i = 1, N_{CD}$ );  $P_{пр,i}$  и  $Q_{пр,j}$  – активная и реактивная мощности прочей нагрузки  $i$ -го узла при номинальном напряжении ( $i = 1, N_C$ );  $Q_{БК,j}$  – мощность батарей конденсаторов, подключенных к  $j$ -му узлу ( $j = 1, N_C$ ). Расчет установившегося режима осуществляется итерационным способом. Условием окончания процесса является выполнение неравенства

$$|U_{y1} - U_{OH}| < \varepsilon, \quad (7)$$

где  $U_{y1}$  - напряжение в первом узле нагрузки;  $\varepsilon$  - требуемая точность расчетов напряжений (0,001).

В соответствии с принятой моделью [3] электрических двигателей активное сопротивление статорных обмоток СД и АД отнесено к сопротивлениям  $Z_{BCD}$  и  $Z_{BAD}$ , характеризующим электрическую удаленность двигателей от секции РУ. Таким образом, напряжения  $U_{BCD}$  и  $U_{BAD}$  (уравнения (3) и (4)) фактически приложены не к выводам двигателей, а за активным сопротивлением статорной обмотки.

Все параметры секций распределительного устройства приведены к  $S_6=40,5$  МВА, а параметры СД, АД приведены к номинальной полной мощности соответствующего двигателя  $S_{ном}$  [2, 3, 12]. Схема замещения подстанции ЭТС очистных сооружений разработана нами на основании представленных нормальных схем электрических присоединений ТП. Общая схема замещения потребителей ЭТС очистных сооружений включает 120 ветвей, 123 выключателя, 4 синхронных генератора, 37 синхронных двигателей, 11 асинхронных двигателей и 38 узлов нагрузки, от которых питается электродвигательная и прочая (не двигательная) нагрузка.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОБОРУДОВАНИЯ ЭТС

При вводе мини-станций на предприятиях стоят задачи: выделения мини-ТЭС или генераторов при недопустимом снижении частоты и/или напряжения в системе на питание собственных нужд и/или сбалансированной нагрузки.

Поэтому были выполнены расчеты статической устойчивости ЭТС совместно с мини-ТЭС при возможном отключении одного питающего трансформатора, от одного до четырех генераторов, а также при изменении состава подключенной нагрузки, а также типа возбудительного устройства СД. Расчеты допустимых установившихся режимов работы потребителей очистных сооружений необходимы для выявления возможности существования этих режимов, определения недопустимости каких-то схем из перечня вышеуказанных.

При существующем режиме работы ЭТС имеется неравномерная нагрузка трансформаторов ГПП (ветви 4 и 5) при почти нулевом перетоке через первый трансформатор, что связано с неравномерной нагрузкой в нормальном режиме на секциях ГПП. Из расчетов следует, что секции ПС 665 имеют почти равную нагрузку:  $S_{1,сек}=7,16 + j 3,99$ ;  $S_{2,сек}=7,14 + j 3,96$ , хотя нагрузка вводов подстанций ТП-1, ТП-3, ТП-15, ТП-17, ТП-19 и ТП-20 сильно различается.

Результаты проведенных расчетов (табл. 1) подтверждают возможность существования рассматриваемых установившихся режимов (рис. 3). При автономном электроснабжении мощности четырех генераторов достаточно для обеспечения электрической энергией основных потребителей ЭТС для устранения последствий аварий. Параметры режима (напряжения на секциях РУ, трансформаторных подстанций (ТП) и нагрузка элементов СПЭ) находятся в допустимых пределах. Однако рекомендовать этот режим как постоянный недопустимо, т.к. уменьшается надежность

электроснабжения ввиду возможного отключения второго независимого источника – электрической системы.

Согласно ГОСТ по устойчивости энергосистем [5], в исходном режиме коэффициент запаса устойчивости должен быть не менее 20%, что обеспечивается для рассматриваемой ЭТС очистных сооружений:

$$K_{зап} = (1,05 - 0,75) / 1,05 * 100 = 28,57\%.$$

Коэффициент запаса устойчивости в послеаварийном режиме должен быть не менее 8%, а он равен:

$$K_{зап} = (1,05 - 0,85) / 1,05 * 100 = 19,05\%.$$

Однако, если при этом еще и отключены генераторы, то

$$K_{зап} = (1,05 - 0,915) / 1,05 * 100 = 12,85\%.$$

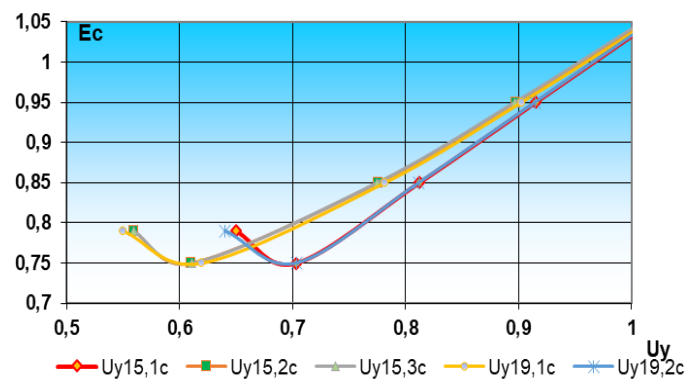


Рис. 3. Кривые изменения ЭДС системы в функции напряжения на шинах секций ТП-15 и ТП-19

При выводе в ремонт трансформатора запас статической устойчивости ЭТС для соответствующих секций ТП, как показали расчеты, снижается еще на 9%, рис. 4.

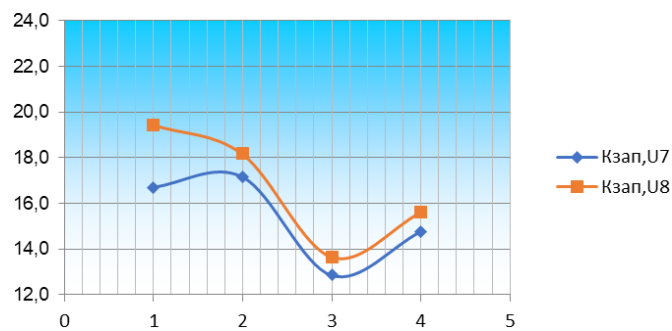


Рис. 4. Кривые запаса устойчивости по напряжения для 1 и 2 секций ТП-15:  
1 –  $G_1$  откл.; 2 –  $G_{1,2}$  откл.; 3 –  $G_{1,2,3}$  откл.; 4 –  $G_{1,2,3,4}$  откл.

При отключении блока по 2433кВт генерирующей станции критические напряжения на шинах разных секций ТП повышаются, а их колебания вызваны изменениями установившегося режима работы для рассматриваемого случая ЭТС (рис. 5).

Изменение типа возбудительного устройства СД для ЭТС с большой долей синхронной нагрузки, как показали расчеты, практически не влияет на коэффициент запаса устойчивости, а увеличение коэффициента загрузки АД и СД с 0,8 до 0,9 приводит к снижению запаса устойчивости на 3-5% для разных секций ТП. Выполненные расчеты установившихся режимов при изменениях загрузки ЭД в

допустимых пределах, отключениях трансформатора и генераторов подтвердили требуемый запас статической устойчивости ЭТС ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ. Для обеспечения автономного запуска потребителей ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ расчетами доказана необходимость ввода еще одного генератора.

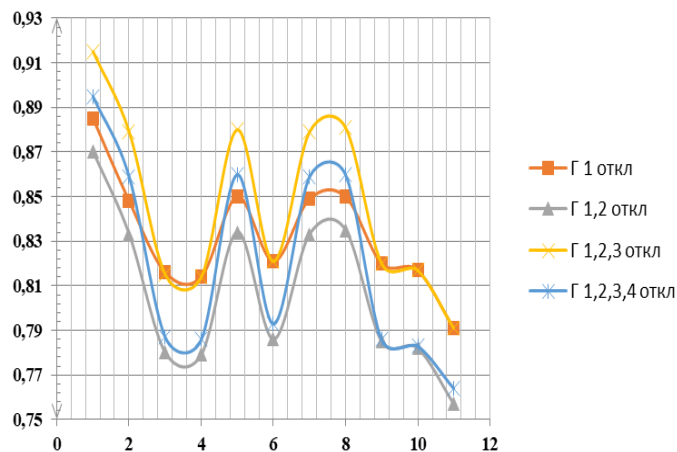


Рис. 5. Изменения критического напряжения для секций ТП при отключении генераторов мини-станции: 1 –  $E_c$ ; 2 –  $U_7$ ; 3 –  $U_8$ ; 4 –  $U_9$ ; 5 –  $U_{10}$ ; 6 –  $U_{15}$ ; 7 –  $U_{16}$ ; 8 –  $U_{11}$ ; 9 –  $U_{12}$ ; 10 –  $U_{24}$ ; 11 –  $U_{21}$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительство мини-станции мощностью 10 МВт с применением поршневых двигателей, электрических генераторов мощностью 4x2,5 МВА на ЭТС очистных сооружений позволяет: улучшить экономические показатели предприятия за счет внутреннего обеспечения электроэнергией предприятия, используя связь с электрической системой независимого источника электроснабжения в аварийных и послеаварийных режимах; уменьшить потери мощности и энергии в электрических сетях за счет изменения потоков мощностей.

1. Целесообразным установившимся режимом системы электроснабжения ЭТС является режим при раздельной работе секций ЗРУ-6 кВ и ГРУ-6,3 кВ. Секции ЗРУ-6 кВ являются относительно независимыми по отношению к КЗ в сетях 6 кВ и при этом осуществляется требуемое обеспечение электрической энергией соответствующих потребителей предприятия.

2. При автономном электроснабжении от мини-станции мощности четырех генераторов недостаточно для обеспечения электрической энергией всех потребителей ЭТС для существующих нагрузок. Параметры режима (напряжения на секциях РУ и загрузка элементов СПЭ) находятся в допустимых пределах. Однако рекомендовать этот режим как постоянный недопустимо, поскольку уменьшается надежность электроснабжения вследствие отключения второго независимого источника – электрической системы.

3. В режиме при выводе в ремонт трансформатора запас статической устойчивости для соответствующих секций ТП снижается еще на 9%.

4. В послеаварийных режимах системы электроснабжения ЭТС, связанных: с отключением одного из транс-

форматоров ГПП; с отключением одного из генераторов станции – обеспечивается электроснабжение всех потребителей при напряжениях на секциях РУ и загрузке элементов СПЭ в допустимых пределах. Такие режимы вполне допустимы до полной ликвидации последствий аварийных отключений.

5. Запас статической устойчивости в исходном режиме для всех секций ТП соответствует требованиям ГОСТ по устойчивости энергосистем. В режиме при отключении одного генератора мини-ТЭС он более 16%, при выводе в ремонт трансформатора снижается еще на 9%, а при отключении 3-х генераторов станет меньше требуемой величины для послеаварийного режима согласно ГОСТ по устойчивости энергосистем для нескольких ТП.

6. В послеаварийных режимах системы электроснабжения ЭТС, связанных: с отключением одного из трансформаторов ГПП; с отключением одного из трансформаторов ГПП и одной из линий связи ЗРУ-ГРУ; с отключением одного из генераторов – обеспечивается электроснабжение всех потребителей при напряжениях на секциях РУ и загрузке элементов СПЭ в допустимых пределах. Такие режимы вполне допустимы до полной ликвидации последствий аварийных отключений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Быстрицкий Г.Ф. Энергосиловое оборудование промышленных предприятий: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – 4-е изд., стер. – М.: Издательский центр "Академия", 2008. – 304 с.
- Веников В.А. Электрические системы и электрические сети / В.А. Веников, В.А. Строев. – М.: Высшая школа, 1998. – 512 с.
- Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем / В.И. Идельчик, под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.
- ГОСТ 29328-92. Установки газотурбинные для привода турбогенераторов. Общие технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1992.
- Закутнов В.А. Обеспечение условий совместной работы мини-станции и питающей энергосистемы в составе электротехнического комплекса очистных сооружений: дис. .... канд. техн. наук. – М., 2016. – 169 с.
- ГОСТ Р 58058-2018 Устойчивость энергосистем Нормы и требования. – М.: Стандартинформ, 2018. – 15 с.
- Грунтович Н.В. Прогнозирование энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения при внедрении мероприятий по энергосбережению / Н.В. Грунтович, Н. Грунтович, А.А. Капанский // Энергоэффективность. – 2016. – № 1. – С. 20-24.
- Гуревич Ю.Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А.А. Окин. – М.: Энергоиздат, 1990. – 390 с.
- Ершов М.С. Устойчивость промышленных электротехнических систем / М.С. Ершов, А.В. Егоров, А.А. Трифонов. – М.: ООО «Издательский Дом Недр», 2010. – 319 с.
- Закутнов В.А. Моделирование и расчет режимов работы электротехнического комплекса очистных сооружений при наличии мини-ТЭС // Международн. научно-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов "Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов". – Тольятти. – С. 21-26.

11. Мелешкин Г.А. Устойчивость энергосистем: Монография / Г.А. Мелешкин, Г.В. Меркурьев. – СПб.: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2006. – 369 с.
12. Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем: Монография / Г.В. Меркурьев, Ю.М. Шаргин. – СПб.: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2006. – 300 с.
13. Пупин В.М. Проектирование и расчет систем электроснабжения при наличии собственной генерации / В.М. Пупин, В.А. Закутнов, Д.С. Куфтин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 1. – С. 32-39.
14. Федоров О.В. Энергетическая политика: учебное пособие для вузов / О.В. Федоров, А.Б. Дарьенков. – М.: КноРус, 2015. – 294 с.
15. Шелушенина О.Н. Обеспечение резервного питания потребителей от энергосистемы при работе мини-ТЭС в автономном режиме / О.Н. Шелушенина, В.М. Дашков, Ю.П. Кубарьков // Тр. Кольского научного центра РАН. – 2012. – № 1(11). – С. 92-97.
16. Abur A. Power system state estimation. Theory and implementation / A. Abur, A.G. Exposito. – Marcel Dekker, 2004.
17. Bertani A. Management of Low Voltage Grids with High Penetration of Distributed Generation: concepts, implementations and experiments / A. Bertani, A. Borghetti, C. Bossi, L. De Biase, O. Lamquet, S. Massucco, A. Morini, C.A. Nucci, M. Paolone, E. Quaia, F. Silvestro // Proc. of CIGRE general session, Paris, 2006
18. Brown R.E. Assessing the reliability of distribution networks / R.E. Brown, A.P. Hanson, H.L. Willis // IEEE Computer Applications in Power Magazine. – 2001. – Vol. 14, №1. – P. 44-49.
19. Gumerman E. Evaluation Framework and Tools for Distributed Energy Resources / E. Gumerman, R. Bharvirkar, K. Hamachi LaCommare, C. Marnay – Berkeley CA: Berkeley Lab, 2003.
20. Hindmarsh J. Electrical Machines and Drives / J. Hindmarsh, A. Renfrew // Elsevier Science. Third Edition. ISBN: 9780080505190. – 336 p.
21. Kwasinski A. Quantitative model and metrics of electrical grids' resilience evaluated at a power distribution level // Energies. – 2016. – Vol .9, № 2. – P.1–27. DOI: 10.3390/en9020093.
22. Kersting W. Distribution System Modeling and Analysis. – Boca Raton: CRC Press, 2002.
23. Mariesa L. Crow Computational Methods for Electric Power Systems: Second Edition. – CRC Press, 2010. – 304 p.
24. Pecos Lopes J.A. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities / J.A. Pecos Lopes, N. Hatziaargyriou, J. Mutale, P. Djapic, N. Jenkins // Electric Power Systems Research. – 2007. – Vol. 77. – P. 1189-1203.
25. Willis H. Distributed Power Generation: Planning and Evaluationю – Boca Raton: CRC Press, 2000.

DOI: 10.24892/RIJIE/20220411

# Studies of the Static Stability Margin of ETS with its Own Generation as Part of a Complex of Treatment Facilities

Pupin V.M.

NPK Promir LLC  
Moscow, Russian Federation  
[vpupin@nkpromir.com](mailto:vpupin@nkpromir.com)

Zakutnov V.A.

Moscow, Russian Federation  
[zakutnv@rambler.ru](mailto:zakutnv@rambler.ru)

Fedorov O.V.

Nizhny Novgorod State Technical University  
named after R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russian Federation  
[fov52@mail.ru](mailto:fov52@mail.ru)

**Abstract.** The use of own sources of electricity in production is increasing, in this regard, the problem arises of ensuring the conditions for the joint operation of autonomous and centralized power sources of power supply systems for production. A mathematical model and a criterion for calculating the static stability of power supply systems with autonomous and centralized sources and a closed structure of electrical networks are presented. The method for calculating the parameters of the static stability of ETS with a combined composition of sources has been brought to the STAT100 program. A mathematical model of an electrical system with a centralized and autonomous multi-unit power source has been developed, which makes it possible to simulate ETS modes in the presence of closed circuits in the internal power supply system with control of the EMF angles of generators, synchronous (SM) and asynchronous motors (IM) relative to the EMF of the balancing node, which makes it possible to increase the accuracy of calculations of the ETS stability indicators. The calculations of the static stability of the ETS to-

gether with the mini-CHP were performed with the possible disconnection of one supply transformer, from one to four generators, as well as with a change in the composition of the connected load, as well as the type of excitatory device SM.

Computational studies have confirmed that the static stability margin in the initial mode for all sections of the TS meets the requirements of GOST for the stability of power systems. In the mode, when one mini-CHP generator is turned off, it is more than 16%, when the transformer is taken out for repair, it decreases by another 9%, and when 3 generators are turned off, it will become less than the required value for the post-emergency mode according to GOST on the stability of power systems for several transformer substations.

**Keywords:** generator, closed loop, modeling, electrotechnical complex of treatment facilities, synchronous motor, steady state, power supply system.