

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ НАЛИЧИИ МИНИ-ТЭС

**В.А. Закутнов<sup>1</sup>, В.М. Пупин<sup>2</sup>, О.В. Федоров<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> АО «Мосводоканал», г. Москва, Россия,

<sup>2</sup> Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия,

<sup>3</sup> Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены комбинированные системы электроснабжения на примере очистных сооружений большой мощности. Ввиду того, что основными потребителями таких систем являются турбовоздуходувки, насосы, смесители, задвижки, часть из которых относятся к потребителям первой и особой категории, то для них требуется собственный третий источник типа мини-станции. При проектировании и внедрении мини-станций на очистных сооружениях актуальны задачи выбора напряжения, расчета статической и динамической устойчивости ЭТС, а также обеспечения надежных режимов параллельной и автономной работы энергосистемы и собственной генерации, особенно когда западные решения приняты с рядом допущений. Выполнены расчеты устойчивости таких систем, определены критические длительности нарушения внешнего электроснабжения и предложены решения по повышению надежной работы станций.

*Ключевые слова:* динамическая устойчивость, критическая длительность нарушения электроснабжения, комбинированные источники питания, очистные сооружения.

### Введение

Для электротехнических комплексов (ЭТС) с питающей энергосистемой и мини-станцией актуальны задачи выбора напряжения, расчета статической и динамической устойчивости комбинированных систем [1, 2], релейной защиты и автоматики, а также режимов параллельной и автономной работы энергосистемы и собственной генерации [3, 4]. Работа таких ЭТС очистки сточных вод, обработки осадка, утилизации бытового мусора (ввиду большого числа приводов с ЧРП) связана с повышением надежности и эффективности электроснабжения [5, 6]. Важнейшим ресурсом энергосбережения на очистных сооружениях является обработка осадка сточных вод и органической составляющей бытового мусора, которые представляют биомассу, переработав которую получают различные виды энергии, предназначенные для последующего сжигания биогаза [7, 8].

### 1. Постановка задачи

Основное назначение очистных сооружений (ОС) – обработка сточных вод, которые проходят 2 стадии очистки [9]:

– механическую (решетки, песколовки, первичные отстойники), на которой происходит удаление из поступающих сточных вод мусора, отбросов, песка и основной массы взвешенных веществ;

– полную биологическую (аэротенки, вторич-

ные отстойники), в ходе которой происходит удаление микроорганизмами активного ила, растворенных в воде органических загрязнений.

Осадок, образующийся в процессе механической и биологической очистки сточных вод на ОС, подвергается сбраживанию в метантенках и приводит к выделению биогаза. Мощность ОС, взятых для исследования, составляет 3,125 млн м<sup>3</sup>/сут. Сейчас за счет очистки сточных вод и обработки осадка внедряются мини-ТЭС [10].

Ядром предложенной в работе мини-ТЭС являются 4 модуля, в которые входят: а) газопоршневой двигатель внутреннего сгорания GE Jenbacher, б) электрогенератор, в) парогенератор, д) система охлаждения [8] (рис. 1). Двигатели мини-ТЭС предусмотрены для смешанного режима работы биогаз/природный газ, чтобы впоследствии энергоблок мог быть переведен на работу на природном газе.

Из схемы работы энергоблока (см. рис. 1) следует, что мини-ТЭС обеспечивает электроэнергией 50 % основных технологических потребителей на станции и будет работать параллельно с централизованными сетями энергоснабжающей организации, за счет чего обеспечивается повышение надежности электроснабжения [5, 11]. Кроме того, мини-ТЭС обеспечивает 30 % потребностей станции в тепловой энергии, за счет чего осуществляется процесс очистки сточных вод в условиях возможного отключения внешних источников энергоснабжения.

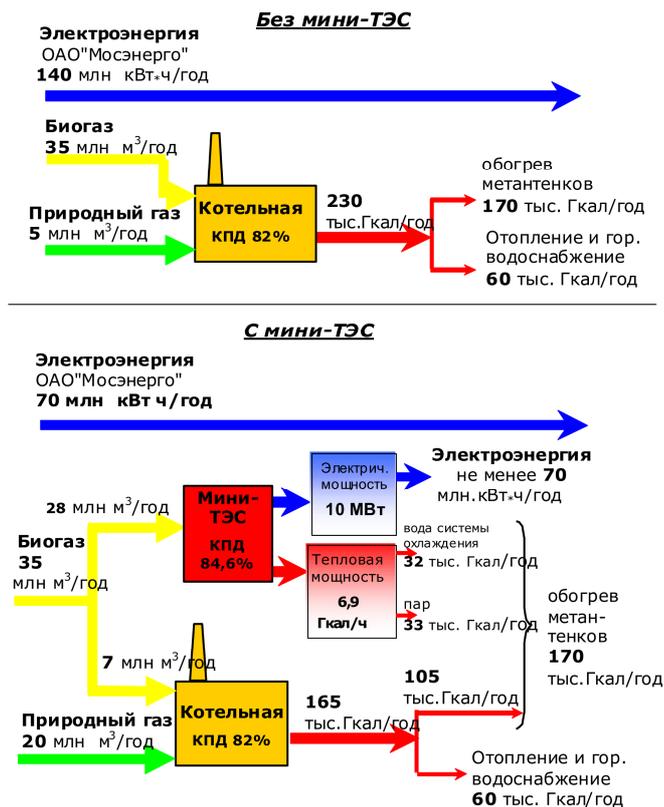


Рис. 1. Годовой теплоэнергетический баланс ОС

## 2. Материалы и методы исследования

Электроснабжение ОС (потребителя особой и первой категории надежности электроснабжения [9]) осуществляется от трех источников пита-

ния: основного 40 МВт, аварийного и автономного мини-ТЭС мощностью 10 МВт (рис. 2). При этом ряд авторов отмечали проблемы в проектировании таких комплексов [12, 13].

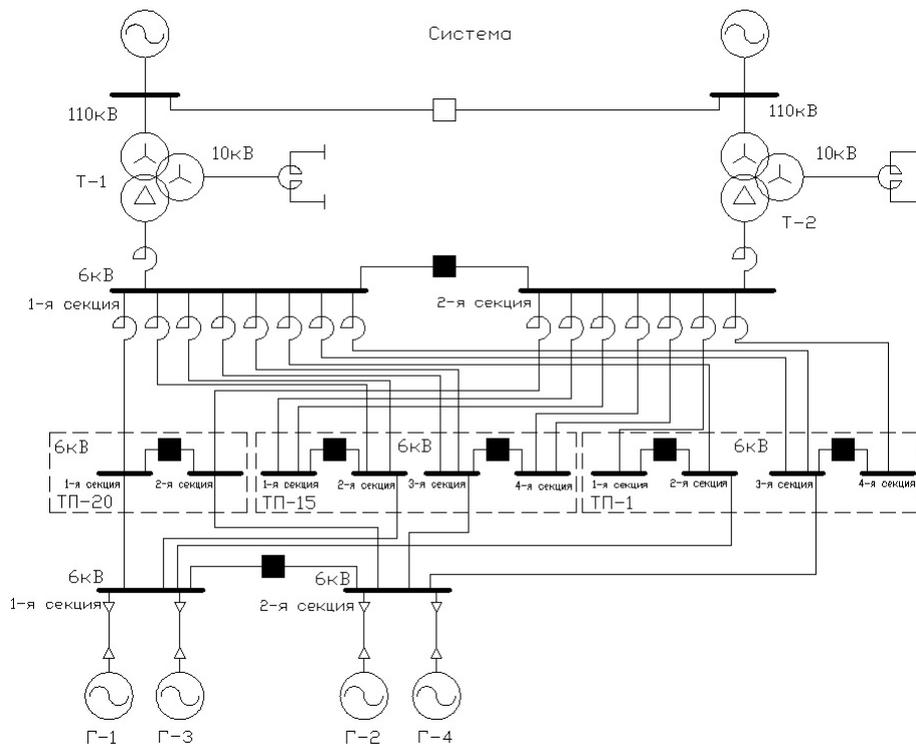


Рис. 2. Упрощенная схема электроснабжения ОС

Длина кабельных линий от основной ПС до ОС составляет от 740 до 2200 м. Длина линий от аварийной ПС до ОС составляет от 3780 до 4876 м. От трансформаторов Т-1 и Т-2 (ГДТНГ-40500 110/10/6 кВ) осуществляется питание потребителей ОС по кабельным линиям напряжением 6 кВ (АСБ 3×240) (ТП-1, 2, 3, 4, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22). В нормальном режиме питание ТП-1, 3, 15, 17, 19, 20 от аварийной ПС не осуществляется. От мини-ТЭС получают питание ТП-1 и ТП-15. От ТП-15 запитаны синхронные двигатели (СД) ДСП-116-49-4 1300 кВт – 9 шт., СТД 1250-2 1250 кВт – 7 шт.; от ТП-1 – асинхронные (АД) АТМ 1200-2 1200 кВт – 4 шт., СТМ 1500-2 1500 кВт – 6 шт.

От мини-ТЭС получают питание агрегаты 2-й и 3-й секций ТП-1 и ТП-15, а остальные двигатели запитаны от основной ПС. На ТП-1 установлены: 1с – СД<sub>17</sub>, СД<sub>18</sub>; 2с – СД<sub>19</sub>, СД<sub>20</sub>, СД<sub>21</sub>; 3с – СД<sub>22</sub>, СД<sub>23</sub>; 4с – СД<sub>24</sub>, СД<sub>25</sub>, СД<sub>26</sub>. На ТП-15 установлены: 1с – СД<sub>1</sub>, СД<sub>2</sub>, СД<sub>3</sub>, СД<sub>4</sub>; 2с – СД<sub>5</sub>, СД<sub>6</sub>, СД<sub>7</sub>, СД<sub>8</sub>; 3с – СД<sub>9</sub>, СД<sub>10</sub>, СД<sub>11</sub>, СД<sub>12</sub>; 4с – СД<sub>13</sub>, СД<sub>14</sub>, СД<sub>15</sub>, СД<sub>16</sub>. На ТП-19 установлены: 1с – АД<sub>1</sub>, АД<sub>2</sub>, СД<sub>27</sub>, СД<sub>28</sub>; 2с – АД<sub>3</sub>, АД<sub>4</sub>, АД<sub>5</sub>, СД<sub>29</sub>; 3с – АД<sub>6</sub>, АД<sub>7</sub>, АД<sub>8</sub>, АД<sub>9</sub>, СД<sub>30</sub>, СД<sub>31</sub>; 4с – АД<sub>10</sub>, АД<sub>11</sub>, СД<sub>32</sub>, СД<sub>33</sub>. Мощность СД напряжением 6 кВ составляет 34,2 МВт, а АД напряжением 6 кВ – 4,0 МВт.

### 3. Результаты исследования

Математическая модель типовой ОС включает 120 ветвей, 123 выключателя, 37 СД (включая 4 генератора), 11 АД и 38 узлов нагрузки, от которых питаются электродвигатели напряжением 380В и прочая нагрузка. Согласно разработанным программам [14] определены запасы статической устойчивости ЭТЭС ОС по величине критического напряжения на шинах секций ТП для исходной схемы, при отключении трансформатора и генераторов мини-станции (табл. 1). При автономном питании мощности четырех генераторов достаточно для работы основных потребителей ОС и устранения последствий аварий.

В соответствии с указаниями по устойчивости энергосистем [15] в исходном режиме коэффициент запаса устойчивости должен быть не менее 20 %, что и обеспечивается для ОС:

$$K_{\text{зап}} = (1,05 - 0,75)/10,5 \cdot 100 = 28,57 \%$$

Коэффициент запаса устойчивости в послеаварийном режиме [16, 17] должен быть не менее 8 %, а он равен:

$$K_{\text{зап}} = (1,05 - 0,85)/10,5 \cdot 100 = 19,05 \%$$

Когда еще отключены генераторы, то

$$K_{\text{зап}} = (1,05 - 0,915)/10,5 \cdot 100 = 12,85 \%$$

При выводе в ремонт трансформатора запас статической устойчивости ЭТЭС, как показали расчеты, снижается еще на 9 %.

Для проверки правильности выбора электрооборудования [18–20] проведены расчеты ЭТЭС при коротких замыканиях (КЗ) в сети 110 кВ длительностью 200 мс (табл. 2).

Из расчетов КЗ и восстановления электропитания [10] выявлено, критическое время при трехфазном КЗ в узле 1 составляет  $t_{\text{кр}} = 0,26$  с (рис. 3).

Из анализа этих переходных процессов выбега и самозапуска СД привода турбовоздуходувки мощностью 1250 на 1с ТП-15 следует, что параметры двигателя долго (до 5 с) не достигают установившихся значений (см. рис. 3).

Ток статора СД в первый момент самозапуска возрастает до 6,9 о.е. (см. рис. 3), превышая значения пускового тока из каталожных данных, что вызывает дополнительный износ оборудования. Наиболее опасны при этом колебания активной мощности (момента) СД, которые значительно превышают кратность максимального момента двигателя  $P_{\text{сз}} > P_{\text{max}}$  ( $3,95 > 2,5$ ). Следует отметить, что опрокидывание СД происходит в момент  $T = 0,31$  с, когда угол нагрузки двигателя превышает  $180^\circ$ .

Расчет переходных процессов при КЗ в сетях 10 кВ показал, что процессы протекают так, что при длительности КЗ 0,25 с не происходит нарушение устойчивости СД и АД. Режим работы потребителей ОС при КЗ в сетях 10 кВ (табл. 3)

Нарушение устойчивости установившегося режима

Таблица 1

Наименование схемы ЭТЭС	$U_v$ , о.е.							
	ТП-15				ТП-19			
	1с	2с	3с	4с	1с	2с	3с	4с
Исходный	0,703	0,610	0,611	0,706	0,620	0,704	0,619	0,699
Генератор Г1 отключен	0,848	0,816	0,814	0,850	0,821	0,849	0,821	0,844
Трансформатор Т1 отключен	0,714	0,708	0,708	0,716	0,716	0,715	0,716	0,710

Параметры секций и двигателей в начальный момент самозапуска после КЗ в сети 110 кВ

Таблица 2

Режим	Напряжение ТП, о.е.	Угол нагрузки СД $\delta$ , рад	Напряжение $U_{\text{ад}}$ , о.е.
Однофазное КЗ в узле 4	$U_{v,21} = 0,859$	$\delta_{15} = 1,425$	$U_6 = 0,923$
Междуфазное КЗ в узле 4	$U_{v,21} = 0,824$	$\delta_{14} = 1,458$	$U_6 = 0,981$
Трехфазное КЗ в узле 4	$U_{v,21} = 0,664$	$\delta_{14} = 2,655$	$U_6 = 0,722$

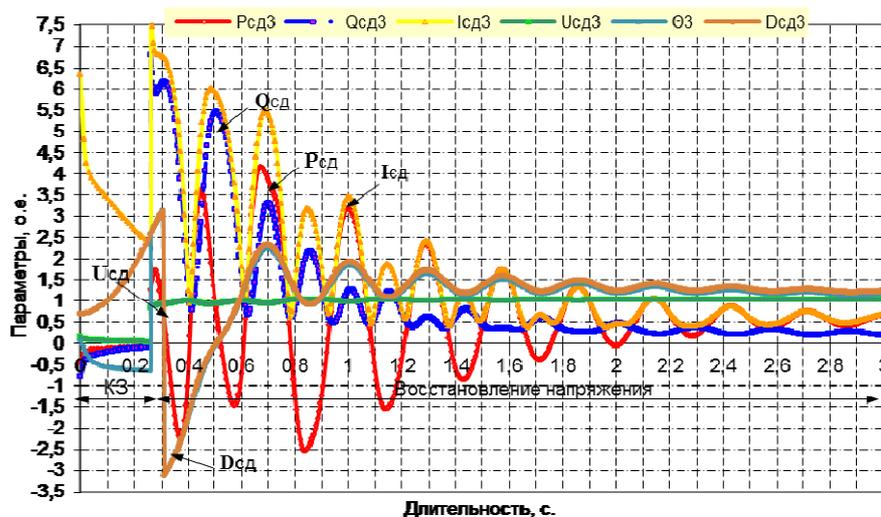


Рис. 3. Параметры режима СД<sub>3</sub> при выбеге на КЗ и при восстановлении напряжения

Таблица 3

Параметры секций и двигателей в начальный момент самозапуска после трехфазного КЗ в сети 10 кВ

Режим	Напряжение ТП, о.е.	Угол $\delta$ (рад) нагрузки СД	Ток СД, о.е.	Ток АД, о.е.
КЗ в узле 7 $T_{КЗ} = 0,25$ с	$U_{v,21} = 0,952$	$\delta_3 = 0,863$	$I_3 = 3,02$	$I_4 = 3,18$
КЗ в узле 11 $T_{КЗ} = 0,2$ с	$U_{v,21} = 0,773$	$\delta_{15} = 1,437$	$I_{15} = 1,95$	$I_6 = 1,82$
КЗ в узле 11 $T_{КЗ} = 0,25$ с	$U_{v,21} = 0,760$	$\delta_{15} = 1,472$	$I_{15} = 1,99$	$I_6 = 1,91$

не приводит к нарушению устойчивости при отключениях КЗ РЗА за время 0,2–0,5 с. На основании исследований определили:

- при трехфазном коротком замыкании на шинах 1с и 4с ТП-15 токи СД в момент восстановления  $I_{с3}$  напряжения превышают пусковой ток  $I_{п}$  двигателей ( $I_{с3} > I_{п} = 7,72 > 6,48$  о.е.), что вызовет значительные электрические и механические воздействия как на СД, так и на приводимый механизм;

- при трехфазном КЗ на шинах 1с, 2с и 3с ТП-19 токи АД в момент восстановления напряжения значительно (на 36 и 63 %) превышают пусковой ток двигателей ( $I_{с3} > I_{п} = 8,2 > 6,0$  о.е.), что вызовет электрические и механические воздействия как на АД, так и на приводимый механизм;

- при трехфазном КЗ в цепи питания мини-ТЭС длительностью 0,25 с динамическая устойчивость генераторов  $\delta_r$  ввиду достижения ими критического угла нагрузки  $\delta_{кр}$  ( $\delta_r > \delta_{кр} = 1,8 > 1,57$  рад) нарушается;

- режимы при трехфазных КЗ длительностью 250 мс в узлах нагрузки напряжением 6 кВ не имеют динамической устойчивости, так как синхронные машины выпадают из синхронизма.

Устойчивость систем с комбинированными источниками нужно оценивать на основании кривой  $\delta(t)$  [2, 11, 15], которая строится при расчетах аварийных режимов. Динамическая устойчивость генераторов мини-станции нарушается при КЗ длительностью 250 мс.

Минимальная критическая длительность трехфазного КЗ в электрической внутривзводской сети 6 кВ имеет место при КЗ в цепи питания мини-ТЭС и составляет  $T_{кр} = 0,18$  с.

При модернизации схемы связи мини-ТЭС и питающей энергосистемы можно сделать так, чтобы потребители разных секций подстанций ОС были бы в более выгодных условиях.

### Выводы

1. Проведенные расчеты переходных процессов выбега на КЗ и самозапуска электродвигателей для существующей и предлагаемой схем ОС выявили, что характер и вид переходных процессов в СД и АД улучшился. Токи включения электродвигателей при восстановлении питания меньше пусковых.

2. Угол нагрузки СД в предложенной схеме электроснабжения ОС не достиг  $180^\circ$ , т. е. ресинхронизация СД не произошла. Ток и момент СД значительно меньше значений для существующей схемы электроснабжения.

3. Процессы в модернизированной схеме связи мини-ТЭС и питающей подстанции при КЗ в сетях 10 кВ подтверждают, что они не опасны по электрическим и механическим параметрам.

4. Обоснована замена устройств АВР на ТП-1,15,19 и мини-ТЭС на БАВР 072 со временем работы 26–65 мс для исключения техногенных аварий, остановов потребителей.

### Литература

1. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities / J.A. Pecas Lopes, N. Hatzigrygiou, J. Mutale et al. // *Electric Power Systems Research* 77. – 2007. – P. 1189–1203. DOI: 10.1016/j.epsr.2006.08.016
2. Evaluation Framework and Tools for Distributed Energy Resources / E. Gumerman, R. Bharvirkar, LaCommare K. Hamachi, C. Marnay // LBNL-52079. Berkeley, CA: Berkeley Lab, February 2003. DOI: 10.2172/816218
3. Эффективность распределенной энергетики в условиях минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов и др. // *Промышленная энергетика*. – 2019. – № 5. – С. 8–16.
4. Ершов, М.С. Устойчивость промышленных электротехнических систем / М.С. Ершов, А.В. Егоров, А.А. Трифонов. – М.: ООО «Издательский Дом Недра», 2010. – 319 с.
5. Киреева, Э.А. Повышение надежности, экономичности и безопасности систем цехового электропитания / Э.А. Киреева. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2002. – 76 с.
6. Федоров, О.В. Оценки эффективности частотно-регулируемых электроприводов / О.В. Федоров. – Инфра-М, 2011. – 144 с.
7. Стычинский, З.А. Возобновляемые источники энергии: Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / З.А. Стычинский, Н.И. Воронай. – М.: Книга, 2010. – 223 с.
8. Быстрицкий, Г.Ф. Энергосиловое оборудование промышленных предприятий: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / Г.Ф. Быстрицкий. – М.: Издательский центр «Академия». – 4-е изд., стер., 2008. – 304 с.
9. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. – М.: Минрегион России, 2012. – 92 с.
10. Закутнов, В.А. Как защитить электрооборудование от провалов напряжений / В.А. Закутнов, В.М. Пупин, Д.О. Сафонов // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. – 2015. – № 2. – С. 21–28.
11. Chanan Singh. Electric Power Grid Reliability Evaluation: Models and Methods / Chanan Singh, Panida Jirutitijaroen, Joydeep Mitra. – Wiley-IEEE Press, 2018. – 352 p. DOI: 10.1002/9781119536772
12. Беляев, А.В. Защита, автоматика и управление на электростанциях малой энергетики (Часть 2) / А.В. Беляев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2010. – 84 с.
13. Беляев, А.В. Проблемы параллельной работы ЭСН КС с энергосистемой / А.В. Беляев, В.Я. Шмурьев, М.А. Эдлин // *Газовая промышленность*. – 2004. – № 7. – С. 70–71.
14. А.с. 2016615994 Российская Федерация. Программа исследований режимов работы электротехнического комплекса (ЭТК) с собственной генерацией от питающей энергосистемы до потребителей напряжением 380 В ТКЗ\_СГ / В.А. Закутнов, В.М. Пупин. – № 2016614257; заявл. 20.04.2016; рег. 02.06.2016.
15. Методические указания по устойчивости энергосистем СО № 153-34.20.576-2003 от 30.06.2003. – М.: Изд-во Департамента науки и техники РАО «ЕЭС России», 2003. – 6 с.
16. Мелешкин, Г.А. Устойчивость энергосистем. Теория: моногр. / Г.А. Мелешкин, Г.В. Меркурьев. – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 350 с.
17. Меркурьев, Г.В. Устойчивость энергосистем. Расчеты: моногр. / Г.В. Меркурьев, Ю.М. Шаргин. – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 300 с.
18. Miao, Z. Modeling and Dynamic Stability of Distributed Generations / Z. Miao. – Morgantown, West Virginia, 2002. – 180 p.
19. Management of Low Voltage Grids with High Penetration of Distributed Generation: concepts, implementations and experiments / A. Bertani, A. Borghetti, C. Bossi et al. // *Proc. of CIGRE general session, Paris*. – 2006.
20. Distribution systems fault analysis considering fault resistance estimation / A.D. Filomena, M. Resener, R.H. Salim, A.S. Bretas // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2011. – Vol. 33. – P. 1326–1335. DOI: 10.1016/j.ijepes.2011.06.010

**Закутнов Владислав Андреевич**, канд. техн. наук, начальник цеха Курьяновских очистных сооружений, АО «Мосводоканал», г. Москва, zakutnv@rambler.ru.

**Пупин Валерий Михайлович**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника и электрификация нефтяной и газовой промышленности», Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва; vrupin@mail.ru.

**Федоров Олег Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород; fov52@mail.ru.

Поступила в редакцию 28 января 2021 г.

## ENSURING OPERATING CONDITIONS OF TREATMENT FACILITIES IN THE PRESENCE OF MINI-TPP

V.A. Zakutnov<sup>1</sup>, Zakutnv@rambler.ru,

V.M. Pupin<sup>2</sup>, vpupin@mail.ru,

O.V. Fedorov<sup>3</sup>, fov52@mail.ru

<sup>1</sup> JSC Mosvodokanal, Moscow, Russian Federation,

<sup>2</sup> Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation,

<sup>3</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

This paper dwells upon combined power systems operated at high-capacity wastewater treatment facilities. Given that such systems are in place mainly to supply power to turbo blowers, pumps, mixers, and gate valves, some of which constitute critical loads, they require a tertiary power source in place, e.g. a small power plant. When designing and adopting such units for use at wastewater treatment facilities, engineers need to choose the appropriate voltage rating, to calculate the static and dynamic stability of the power plant, and to ensure that the power system and the onsite generation facilities function reliably whether in parallel or in islanded operation, especially in cases where western solutions have been implemented with some assumptions. The paper also presents stability estimates for such systems, defines the critical external power outage durations, and proposes solutions for more reliable power plant operation.

*Keywords: dynamic stability, critical power outage duration, combined power supply, wastewater treatment facilities.*

### References

1. Pecas Lopes J.A., Hatziaargyriou N., Mutale J., Djapic P., Jenkins N. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, 2007, vol. 77, pp. 1189–1203. DOI: 10.1016/j.epsr.2006.08.016
2. Gumerman E., Bharvirkar R., Hamachi LaCommare K., Marnay C. *Evaluation Framework and Tools for Distributed Energy Resources*. LBNL-52079. Berkeley, CA: Berkeley Lab, February 2003. DOI: 10.2172/816218
3. Abramovich B. N., Sychev Yu. A., Ustinov D. A., Babanova I. S., Prokhorova V. B. [Efficiency of distributed power engineering in the conditions of the mineral resource complex]. *Industrial power engineering*, 2019, no. 5, pp. 8–16. (in Russ.)
4. Yershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. *Ustoychivost' promyshlennykh elektrotekhnicheskikh sistem* [Stability of industrial electro technical systems]. Moscow, LLC "Publishing House Nedra", 2010. 319 p.
5. Kireeva E.A. *Povysheniye nadezhnosti, ekonomichnosti i bezopasnosti sistem tsekhovogo elektrosnabzheniya* [Improving the reliability, efficiency and safety of workshop power supply systems]. Moscow, NTF "Energoprogress" Publ., 2002. 76 p.
6. Fedorov O.V. *Otsenki effektivnosti chastotno-reguliruyemykh elektroprivodov* [Evaluation of the efficiency of frequency-controlled electric drives]. Infra-M Publ., 2011. 144 p.
7. Stychinskiy Z.A., Voropay N.I. *Vozobnovlyayemye istochniki energii: Teoreticheskiye osnovy, tekhnologii, tekhnicheskiye kharakteristiki, ekonomika* [Renewable energy sources: Theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics]. Moscow, Kniga Publ., 2010. 223 p.
8. Bystritskiy G.F. *Energosilovoye oborudovaniye promyshlennykh predpriyatiy: ucheb. posobiye dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy. 4-e izd., ster.* [Fundamentals of heat engineering and power equipment of industrial enterprises: Textbook]. 5th ed. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 304 p.
9. SP 32.13330.2012. *Kanalizatsiya. Naruzhnyye seti i sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.04.03–85* [Sewerage. Outdoor networks and structures. Updated version of SNIp 2.04.03-85]. Moscow, Minregion Rossii Publ., 2012. 92 p.
10. Zakutnov V.A., Pupin V.M., Safonov D.O. [How to protect electrical equipment from voltage failures]. *Electrical equipment: operation and repair*, 2015, no. 2, p. 21–28. (in Russ.)
11. Chanan Singh, Panida Jirutitijaroen, Joydeep Mitra. *Electric Power Grid Reliability Evaluation: Models and Methods*. Wiley-IEEE Press, 2018. 352 p. DOI: 10.1002/9781119536772

12. Belyaev A.V. *Zashchita, avtomatika i upravleniye na elektrostantsiyakh maloy energetiki (Chast' 2)* [Protection, automation and control at small-scale power plants (Part 2)]. Moscow, NTF "Energoprogress" Publ., 2010. 84 p.
13. Belyaev A.V., Shmuryev V.Ya., Edlin M.A. [Problems of parallel operation of ESN CS with the power system]. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas industry], 2004, no. 7, pp. 70–71. (in Russ.)
14. Zakutnov V.A., Pupin V.M. *Programma issledovaniy rezhimov raboty elektrotekhnicheskogo kompleksa (ETK) s sobstvennoy generatsiyey ot pitayushchey energosistemy do potrebiteley napryazheniyem 380 V TKZ\_SG* [Program of research of operating modes of an electrotechnical complex (ETC) with its own generation from the power supply system to consumers with a voltage of 380V TKZ\_SG]. Patent RF, no. 2016615994, 2016.
15. *Methodological guidelines for the stability of power systems SB No. 153-34.20. 576-2003 of 30.06.2003*. Moscow, Publishing House of the Department of Science and Technology of RAO "UES of Russia", 2003. 6 p.
16. Meleshkin G.A., Merkur'yev G.V. *Ustoychivost' energosistem. Teoriya: Monografiya* [Stability of power systems. Theory: a monograph]. St. Petersburg, NOU "Center of training of personnel of Power Engineering" Publ., 2006. 350 p.
17. Merkur'yev G.V., Shargin Yu.M. *Ustoychivost' energosistem. Raschety: monografiya* [Stability of power systems. Calculations: Monograph]. St. Petersburg, NOU "Center of training of personnel of Power Engineering" Publ., 2006. 300 p.
18. Miao Z. *Modeling and Dynamic Stability of Distributed Generations*. Morgantown, West Virginia, 2002. 180 p.
19. Bertani A., Borghetti A., Bossi C., De Biase L., Lamquet O., Massucco S., Morini A., Nucci C.A., Paolone M., Quaia E., Silvestro F. Management of Low Voltage Grids with High Penetration of Distributed Generation: concepts, implementations and experiments. *Proc. of CIGRE general session*, Paris, 2006.
20. Filomena A.D., Resener M., Salim R.H., Bretas A.S. Distribution systems fault analysis considering fault resistance estimation. *Electrical Power and Energy Systems*, 2011, vol. 33, pp. 1326–1335. DOI: 10.1016/j.ijepes.2011.06.010

Received 28 January 2021

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Закутнов, В.А. Обеспечение условий работы очистных сооружений при наличии мини-ТЭС / В.А. Закутнов, В.М. Пупин, О.В. Федоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 75–81. DOI: 10.14529/power210108

#### FOR CITATION

Zakutnov V.A., Pupin, V.M., Fedorov O.V. Ensuring Operating Conditions of Treatment Facilities in the Presence of Mini-TPP. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 75–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210108

---