

УДК 626

**М. В. Трохимчук^а, К. А. Гершман^б, Д. П. Шамигулова^а, В. И. Чурикова^б,
А. В. Гершман^в**

^а Филиал МЭИ г. Волжский

^б Волгоградский государственный технический университет

^в ООО «РИТЭК»

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ВОЛЖСКОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В УСЛОВИЯХ УТЯЖЕЛЕННЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ОПЕРАТИВНОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЮГА

Представлена оценка распределения нагрузок на генерирующее оборудование. Проведен анализ статического запаса устойчивости электротехнического оборудования. Разработана математическая модель определения влияния метеорологических условий на загрузку генерирующего оборудования с целью выявления складывающихся запасов статической устойчивости генерирующего оборудования и линий электропередач. Выполнен расчет ожидаемого экономического эффекта от применения разработанной математической модели.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гидроэлектростанция, электротехническое оборудование, математическая модель, нагрузки, утяжеленные и аварийные режимы.

Введение

Одной из важнейших задач в электроэнергетике является обеспечение надежного бесперебойного электроснабжения потребителей. Для обеспечения устойчивого и надежного функционирования электроэнергетической системы применяются специальные комплексы противоаварийной системной автоматики — автоматика предотвращения нарушения устойчивости и автоматика ликвидации асинхронного режима. Однако в некоторых случаях складываются такие сочетания факторов, которые могут привести к отключению ряда потребителей и/или делению энергосистемы на части в целях предотвращения распространения системной аварии.

Целью исследования стала разработка методов повышения надежности работы генерирующего оборудования в режимах повышенной нагрузки в энергосистеме, выполненная на примере филиала ПАО «РусГидро» — «Волжская ГЭС».

Материалы и методы

В начале июля 2024 г. на юге России произошли всеерные отключения потребителей электроэнергии. По данным Министерства энергетики РФ, в Краснодарском крае отключение электроснабжения затронуло более 325 тыс. чел., в Ростовской области — свыше 226 тыс. чел. Причиной отключения стало неблагоприятное стечение обстоятельств: высокое сезонное потребление, вызванное летними температурными максимумами (температура воздуха в Краснодарском крае достигала +38 °C). В Ростовской области отключение электричества произошло из-за аварий и ремонта на объектах энергоснабжения. Авария зафиксирована на Новочеркасской ГРЭС. Кроме того, на ситуацию с энергоснабжением повлиял плановый ремонт одного из блоков Ростовской атомной электростанции и аварийный ремонт блоков Ростовской

ТЭЦ-2 и Волгодонской ТЭЦ-2 [1]. В итоге из энергосистемы выбыло около 1 ГВт. Поскольку Волгоградская область граничит с Ростовской областью и имеет с ней сильные связи по линиям электропередачи, то представляет интерес анализ возникших перетоков мощности и режимов нагрузки гидрогенераторов Волжской ГЭС как крупнейшего энергогенерирующего предприятия Волгоградской области [2, 3].

Проанализированы режимы работы линий электропередачи, гидрогенераторов и силовых трансформаторов филиала ПАО «РусГидро» — «Волжская ГЭС» в период 07.07.2024, в момент наибольшей нагрузки на энергосистему в зоне оперативного диспетчерского управления (ОДУ) юга. В качестве исходных данных взяты: схема выдачи мощности Волжской ГЭС с известными параметрами электрической схемы замещения; данные о режимах и параметрах работы основного оборудования Волжской ГЭС; метеорологические данные за 07.07.2024 [4—7].

Инструментами анализа являются написанные на языке программирования Python программы: программа моделирования электрической схемы выдачи мощности Волжской ГЭС на основе специализированной библиотеки *pandapower*; программа анализа данных о режимах и параметрах работы основного оборудования Волжской ГЭС и метеорологических данных на основе специализированных библиотек *pandas*, *scipy*, *plotly*. Выбор в качестве инструмента для решения поставленной задачи языка программирования Python обусловлен, с одной стороны, сочетанием достаточно простой лексики данного языка, обеспечивающей низкий порог вхождения в программирование с его использованием, а с другой стороны, разнообразием и богатым функционалом различных специализированных библиотек, большая часть которых предназначена именно для решения задач моделирования, анализа и визуализации данных [8].

На рис. 1—11 приведены основные части расчетного блокнота, в котором производится моделирование схемы выдачи мощности Волжской ГЭС.

Исходными данными на рис. 1 является фактическая нагрузка гидрогенераторов Волжской ГЭС в почасовом разрезе, взятая из суточных ведомостей за июль 2024 и 2023 гг., а также за апрель и май 2024 г.

На рис. 2 приведен фрагмент кода, в котором формализуется математическое описание основных элементов схемы выдачи мощности — генераторов, блочных трансформаторов, кабельных линий 220 кВ, воздушных переходов 500 кВ, шин подстанций ОРУ-220 кВ и ОРУ-500 кВ, автотрансформатора связи АТ 10Т, ЛЭП 220 кВ и 500 кВ, а также модели внешней энергосистемы как внешнего источника.

На рис. 3 представлен один из частных результатов работы программы, полученный для следующего момента времени: 07.07.2024, 16:00.

Основными данными, полученными в результате моделирования, являются нагрузки генераторов: активные и реактивные мощности и токи. Также программа определяет параметры работы трансформаторов и линий электропередачи. Кроме того, программа позволяет вычислить величины электрических углов всех элементов системы, передающих мощность. По величине этих углов можно делать выводы о текущем запасе статической устойчивости тех или иных элементов системы, что, в свою очередь, позволяет определить имеющийся резерв загрузки оборудования энергосистемы.

```
gen_names = [f'Г{A{x}}' for x in range(1, 24)]
gen_names.insert(0, 'Время')
gens = pd.read_excel('/content/drive/MyDrive/Colab Notebooks/Data/VKR/2024 07 07.xlsx')
gens.drop(list(gens.columns[2::3]), axis=1, inplace=True)
gens.drop(list(gens.columns[2::2]), axis=1, inplace=True)
gens.columns = gen_names
```

	Время	ГA1	ГA2	ГA3	ГA4	ГA5	ГA6	ГA7	ГA8	ГA9	...	ГA14	ГA15	ГA16	ГA17	ГA18	ГA19	ГA20	ГA21	ГA22	ГA23
0	01:00	0.0	83.6	82.1	0.0	84.5	0.0	76.8	78.0	74.3	...	84.2	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0
1	02:00	0.0	77.4	77.0	0.0	78.1	0.0	70.2	83.3	78.8	...	88.6	0.0	0	83.0	85.5	79.5	0	85.2	79.5	0
2	03:00	0.0	90.2	86.3	0.0	88.2	0.0	82.5	83.1	80.2	...	89.3	0.0	0	82.3	84.3	79.7	0	86.3	80.8	0
3	04:00	0.0	66.9	66.2	0.0	67.5	0.0	50.4	59.5	57.1	...	67.1	0.0	0	50.9	62.9	57.6	0	61.0	57.7	0
4	05:00	0.0	66.5	66.0	0.0	66.9	0.0	58.0	59.1	57.1	...	66.5	0.0	0	58.8	62.7	57.2	0	62.5	57.6	0
5	06:00	0.0	83.7	83.5	0.0	84.0	0.0	77.6	79.1	76.0	...	84.3	0.0	0	79.1	81.7	76.2	0	81.8	76.0	0
6	07:00	0.0	73.8	73.2	0.0	74.5	0.0	66.1	67.4	64.7	...	74.1	0.0	0	66.9	70.5	65.0	0	70.8	65.0	0
7	08:00	0.0	97.8	95.9	0.0	99.0	0.0	92.4	94.2	88.7	...	98.1	0.0	0	92.8	95.7	89.5	0	95.7	89.4	0
8	09:00	0.0	89.4	88.6	-0.3	90.0	0.0	83.3	85.2	80.8	...	90.2	0.0	0	84.5	87.2	81.4	0	87.4	82.0	0
9	10:00	0.0	72.7	72.5	70.3	73.6	0.0	72.0	73.5	70.4	...	73.0	0.0	0	73.1	76.3	70.7	0	76.5	70.9	0
10	11:00	0.0	80.0	78.9	76.3	80.0	0.0	78.4	79.9	76.4	...	79.9	0.0	0	80.2	82.0	76.9	0	82.7	77.0	0
11	12:00	0.0	102.5	101.1	96.8	103.5	104.9	101.0	102.3	97.2	...	103.2	102.2	0	102.4	103.3	98.3	0	103.5	97.8	0
12	13:00	0.0	107.5	105.2	100.9	108.2	108.0	105.4	107.5	101.2	...	108.2	106.8	0	107.2	108.0	102.3	0	108.6	102.4	0

Рис. 1. Исходные данные о загрузке генераторов Волжской ГЭС

```
grid = pp.create_empty_network('Энергосистема ВолГЭС')
ga220 = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13, 14]
bus_block_220 = pp.create_bus(grid, 220, '1Т')
for k in range(10):
    name_ga = f'Г{ga220[k]}'
    pp.create_bus(grid, 13.8, f'Шины 220 {name_ga}')
    pp.create_gen(grid, k + 1, loads[name_ga].values, 1.02 + (random() - 0.5) / 10, 144.9, name_ga, in_service=
    pp.create_transformer_from_parameters(grid, bus_block_220, k + 1, 135, 220, 13.8, 0.25, 12.2, 98.2, 3.14,
ga500 = list(set(range(1, 23)) - set(ga220))
bus_block_500 = pp.create_bus(grid, 500, '4Т')
for k in range(12):
    name_ga = f'Г{ga500[k]}'
    pp.create_bus(grid, 13.8, f'Шины 500 {name_ga}')
    pp.create_gen(grid, k + 12, loads[name_ga].values, 1.00 + (random() - 0.5) / 10, 144.9, name_ga, in_service=
    pp.create_transformer_from_parameters(grid, bus_block_500, k + 12, 135, 500, 13.8, 0.25, 12.2, 98.2, 3.14,
bus_oru_220 = pp.create_bus(grid, 220, 'ОРУ-220')
bus_oru_500 = pp.create_bus(grid, 500, 'ОРУ-500')
bus_volzh_220 = pp.create_bus(grid, 220, 'ПС Волжская')
bus_volga_500 = pp.create_bus(grid, 500, 'ПС Волга')
kl220 = pp.create_line_from_parameters(grid, bus_block_220, bus_oru_220, 1, 0.05, 0.12, 1200, 5, 'КЛ 220')
vl500 = pp.create_line_from_parameters(grid, bus_block_500, bus_oru_500, 1.8, 0.015, 0.3, 6.1, 6, 'ВЛ 500')
tr10T = pp.create_transformer_from_parameters(grid, bus_oru_500, bus_oru_220, 600, 500, 220, 0.025, 52.2, 31.
vl500Volga = pp.create_line_from_parameters(grid, bus_oru_500, bus_volga_500, 22.5, 0.015, 0.3, 6.1, 6, 'Волг
vl220Volzh = pp.create_line_from_parameters(grid, bus_oru_220, bus_volzh_220, 12.25, 0.05, 0.7, 13.1, 5, 'Вол
#ex220 = pp.create_load(grid, bus_volzh_220, 650, -500)
ex500 = pp.create_ext_grid(grid, bus_volga_500, 1, 0)
ex220 = pp.create_ext_grid(grid, bus_volzh_220, 1, 0)
#ex500_load = pp.create_load(grid, bus_oru_500, 0, -200)
```

Рис. 2. Фрагмент программного кода, формирующий описание электроэнергетической системы

Например, в столбце « α_{degree} » таблицы, представленной на рис. 3, приведены значения электрических углов генераторов по отношению к внешней энергосистеме (за начало отсчета углов приняты шины удаленной подстанции 500 кВ, имитирующей энергосистему бесконечной мощности).

Как видно из результатов моделирования, наибольший угол на выводах генератора (для ГА6) не превышает 14° по отношению к внешней энергосистеме. Более подробный анализ полученных результатов для генераторов, трансформаторов и линий электропередач для наиболее тяжелых условий работы энергосистемы юга (середина дня 07.07.2024) показывает, что в элементах энергосистемы, непосредственно связанных с Волжской ГЭС, сохранялся достаточный запас устойчивости: наибольший электрический угол был у гидрогенератора ГА6 — $13,2^\circ$, углами в большинстве случаев можно

считать углы до 60° (угловой запас устойчивости не менее 30°). Для всех остальных элементов системы (остальные генераторы, трансформаторы, линии электропередачи и шины подстанций) электрические углы были меньше.

pp.runpp(grid)
grid.res_gen

	p_mw	q_mvar	va_degree	vm_pu
0	104.2	56.719233	12.931490	1.054442
1	103.2	46.244370	12.934428	1.045795
2	101.0	7.070544	13.031226	1.012057
3	97.0	-11.007809	12.926820	0.995892
4	103.7	17.500847	13.111060	1.021127
5	103.7	5.512994	13.178467	1.010493
6	90.8	48.572992	12.310715	1.048380
7	92.3	-6.477967	12.657766	1.000331
8	103.0	13.514629	13.097525	1.017660
9	103.2	25.738047	13.040989	1.028338
10	89.8	47.206117	6.116137	1.040811
11	91.0	1.011596	6.405670	1.000469
12	86.6	-23.264657	6.306286	0.978184
13	90.9	29.377512	6.255846	1.025580
14	102.6	14.444052	6.932995	1.011837
15	0.0	0.000000	0.000000	0.000000
16	59.9	46.097925	4.629826	1.040975

Рис. 3. Результаты моделирования нагрузки генераторов Волжской ГЭС

Для сравнения также было выполнено моделирование условий наибольшей загрузки Волжской ГЭС в период половодья. Выбрана загрузка Волжской ГЭС 25.05.2024 в 3:00, когда суммарная фактическая мощность составила 2716 МВт. Результаты моделирования показывают, что в данных условиях нагрузка элементов системы была несколько выше. Наибольший электрический угол выявлен у генератора ГА5, работающего на сторону 220 кВ и несущего максимальную по станции нагрузку 126,3 МВт. Этот угол составил $23,4^\circ$. То есть в критических для энергосистемы условиях начала июля 2024 г. оборудование Волжской ГЭС и отходящих ЛЭП работало даже в менее тяжелых условиях, чем те, которые имеют место во время половодья. Тем не менее подобные расчеты загрузки и статической устойчивости оборудования вполне могут быть полезны для прогнозирования более тяжелых условий работы. Например, в ходе моделирования было установлено, что при практически одинаковых нагрузках генераторов (сравнивались нагрузки порядка 100 МВт) большие электрические углы (на $7...12^\circ$) возникают на генераторах, работающих на сторону 220 кВ. То есть при прочих равных условиях более высокий запас устойчивости имеют генераторы, работающие на сторону 500 кВ.

С целью выявления возможного влияния температуры окружающего воздуха на загрузку элементов энергосистемы результаты моделирования генерации и перетоков мощности были сопоставлены с метеорологическими данными за соответствующие периоды времени.

Разрабатываемая модель влияния температуры окружающего воздуха на потребление в содействующей энергосистеме предполагает определение некоторой средней по энергосистеме температуры. Представляется целесообразным определять такую среднюю температуру как

$$\Theta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot \Theta_i}{\sum_{i=1}^N n_i},$$

где N — количество крупных городов-потребителей в рассматриваемой энергосистеме; n_i — численность жителей в i -м городе; Θ_i — температура в i -м городе.

В рамках данной работы анализ городов на предмет отнесения их к крупным не проводился, поскольку задача являлась математически простой. Анализ численности населения был выбран по имеющимся архивным данным.

Сам принцип осуществления анализа влияния температуры на загрузку оборудования Волжской ГЭС проиллюстрирован на основе погодных данных города Волгограда. Цель данного анализа — продемонстрировать принцип его выполнения и показать возможные результаты.

На рис. 4 приведен фрагмент программы, реализующий выборку данных из погодного архива и приводящий их к формату данных, соответствующему формату по загрузке Волжской ГЭС.

```
temperature = pd.read_excel('/content/drive/MyDrive/Colab Notebooks/Data/VKR/Порода 15 июн - 31 июн 22-24 rr.xlsx',
                             sheet_name="2024", parse_dates=[0])
temperature[1000:1020]
```

<ipython-input-136-1f14b1966486>:1: UserWarning:
Parsing dates in %d.%m.%Y %H:%M format when dayfirst=False (the default) was specified. Pass 'dayfirst=True' or specify a format to silence this warning.

	Время	Т	Р0	Р	U
1000	2024-07-03 22:30:00	25.0	744.8	756.2	51.0
1001	2024-07-03 23:00:00	24.0	744.7	756.2	57.0
1002	2024-07-03 23:30:00	24.0	744.7	756.2	57.0
1003	2024-07-04 00:00:00	22.0	744.6	756.2	65.0
1004	2024-07-04 00:30:00	24.0	744.7	756.2	57.0
1005	2024-07-04 01:00:00	23.0	744.7	756.2	57.0
1006	2024-07-04 01:30:00	22.0	745.3	756.9	61.0
1007	2024-07-04 02:00:00	22.0	745.3	756.9	65.0
1008	2024-07-04 02:30:00	21.0	745.3	756.9	69.0
1009	2024-07-04 03:00:00	21.0	745.3	756.9	69.0
1010	2024-07-04 03:30:00	21.0	745.3	756.9	69.0

Рис. 4. Фрагмент программы, реализующий выборку и форматирование данных о погоде в регионе

Основным инструментом анализа взаимосвязи температуры окружающего воздуха и выработки активной мощности Волжской ГЭС является определение и анализ взаимной корреляционной функции между двумя временными процессами (изменение температуры и изменение суммарной мощности станции во времени). Фрагмент соответствующей части программы представлен на рис. 5.

Результаты сопоставления данных о загрузке оборудования и температуры окружающего воздуха приведены на рис. 6—8.

```

fig = make_subplots(specs=[[{"secondary_y": True}]])
fig_r = make_subplots()
for k in range(5, 15):
    y = P_2024_07[k]
    fig.add_trace(go.Scatter(x=P_2024_07['Время'], y= y, name=f'{k:02d}.07.2024', secondary_y= False))
    t1 = temperature[temperature['Время'].between(f'2024-07-{k} 01:00:00', f'2024-07-{k+1}')][0:2]
    t1['Время'] = t1['Время'].dt.hour.astype('string') + ':00'
    t1['Время'].iloc[-1] = '24:00'
    y1 = t1['T']
    fig.add_trace(go.Scatter(x=t1['Время'], y= y1, name=f'T {k:02d}.07.2024', secondary_y=True))
    corr = correlate(y, y1)
    corr /= max(corr)
    fig_r.add_trace(go.Scatter(x=correlation_lags(len(y), len(y1)), y=corr, name=f'{k:02d}.07.2024'))
fig.update_layout(template='none')
fig_r.update_layout(template='none')
fig.show()
fig_r.show()

```

Рис. 5. Фрагмент программы, реализующий визуализацию данных, а также определяющий взаимную корреляционную функцию генерируемой мощности и температуры окружающего воздуха

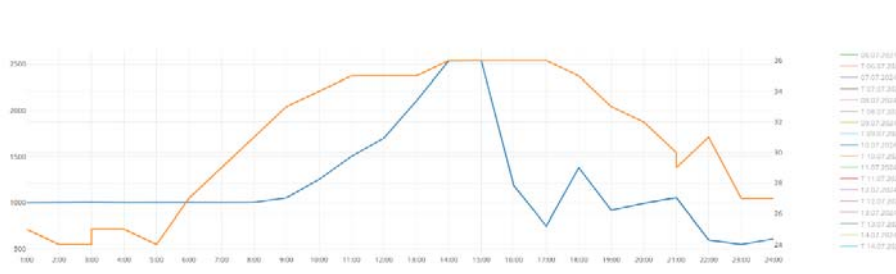


Рис. 6. Изменение суммарной фактической мощности Волжской ГЭС (синяя линия, шкала слева) и температуры окружающего воздуха (оранжевая линия, шкала справа) за сутки 05.07.2024

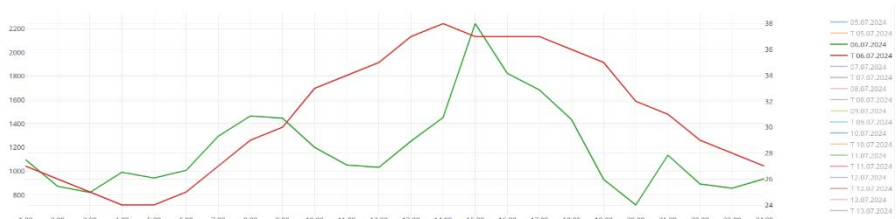


Рис. 7. Изменение суммарной фактической мощности Волжской ГЭС (зеленая линия, шкала слева) и температуры окружающего воздуха (бордовая линия, шкала справа) за сутки 06.07.2024



Рис. 8. Изменение суммарной фактической мощности Волжской ГЭС (фиолетовая линия, шкала слева) и температуры окружающего воздуха (коричневая линия, шкала справа) за сутки 07.07.2024

Для численной оценки влияния температуры воздуха на загрузку оборудования произведен расчет взаимных корреляционных функций процессов изменения температуры окружающего воздуха и мощности выработки.

Взаимные корреляционные функции для периодов с 5 по 8 июля 2024 г. приведены на рис. 9.

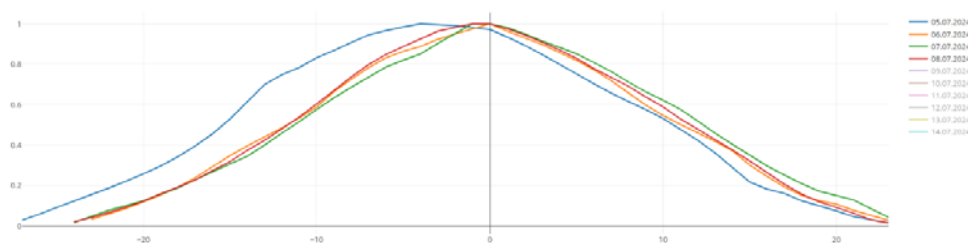


Рис. 9. Взаимные корреляционные функции процессов изменения температуры окружающего воздуха и фактической мощности Волжской ГЭС

Из анализа приведенных данных следует, что наблюдается корреляция между температурой окружающего воздуха и фактической мощностью Волжской ГЭС. В данном простейшем случае (данные по температуре взяты для одного города) такая корреляция, конечно, может быть следствием корреляции температуры со временем суток и корреляции фактической мощности со временем суток (суточный график нагрузки). Поэтому выполнен дополнительный анализ влияния максимальной суточной температуры на величину максимальной фактически вырабатываемой мощности в рассматриваемые сутки. Полученные данные представлены в табл. и на рис. 10.

Данные о максимальной суточной температуре и вырабатываемой мощности в июле 2024 г.

День месяца	Максимальная температура, °С	Максимальная фактическая мощность, МВт
5	36	2536,9
6	38	2241,8
7	38	1903,6
8	34	2284,9
9	32	2424,4
10	34	2441,8
11	34	2270,3
12	30	2068,4
13	30	2327,2
14	31	2288,4

На рис. 10 красной пунктирной линией обозначена линия линейного тренда (линейная регрессионная зависимость). Анализ данных табл. и рис. 10 позволяет сделать вывод о том, что на рассматриваемой выборке данных корреляция между максимальной фактической мощностью и максимальной

суточной температурой практически отсутствует. Однако это может быть объяснено тем, что в качестве температуры использовались данные Волгограда, тогда как основные нагрузки в энергосистеме юга в рассматриваемый период определялись такими городами, как Ростов-на-Дону, Краснодар и другие крупные города юго-западной части [9].

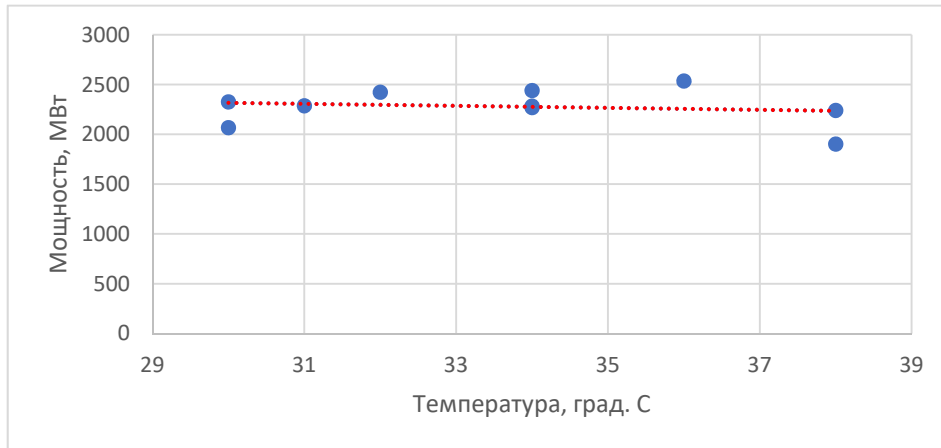


Рис. 10. Зависимость максимальной фактической мощности за сутки от максимальной суточной температуры

Кроме того, разработанная модель выдачи мощности позволяет рассчитать электрические углы для всех генераторов и углы выдачи ими мощности в сеть (рис. 11). Полученные с помощью математической модели данные позволяют оценить угловой запас статической устойчивости генераторов и при необходимости изменить распределение нагрузки между генераторами таким образом, чтобы обеспечить оптимальные значения углового запаса устойчивости с целью недопущения асинхронного хода генераторов в режимах повышенной нагрузки энергосистемы.

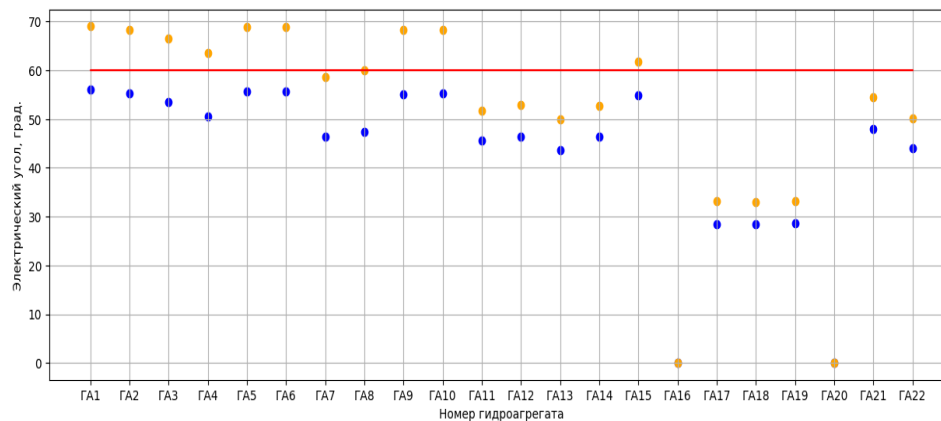


Рис. 11. Результаты определения электрических углов генераторов (синий цвет) и углов выдачи мощности (оранжевый цвет) в момент наибольшей нагрузки 07.07.2026

Технико-экономическое обоснование

Предполагаемый технико-экономический эффект от внедрения предлагаемых методов прогнозирования нагрузки станции в зависимости от метеорологических условий состоит в уменьшении вероятности аварийного отключения одного или нескольких гидрогенераторов по причине потери устойчивости вследствие асинхронного хода в энергосистеме в условиях повышенной нагрузки на элементы системы. Разработанная модель позволяет определять для текущих условий, сложившихся в энергосистеме, величины угловых запасов устойчивости гидрогенераторов и корректировать при необходимости распределение суммарной нагрузки станции таким образом, чтобы свести к минимуму вероятность отключения генератора по причине возникновения асинхронного хода. При этом положительным экономическим эффектом будет исключение штрафных санкций за снижение фактической мощности.

Необходимыми затратами для достижения экономического эффекта являются затраты на разработку и внедрение системы автоматического анализа условий работы энергосистемы с полуавтоматическим режимом выдачи начальнику смены станции рекомендаций о распределении заданной суммарной нагрузки. По данным из открытых источников (приказ Федеральной антимонопольной службы России от 11.12.2024 № 992/24), плата за установленную мощность Волжской ГЭС составляет на первое полугодие 2025 г. 143 767,69 руб. за МВт в месяц и за второе полугодие 151 882,50 руб. за МВт в месяц. Так как рассматриваемые нарушения в работе энергосистемы наиболее вероятны в июне и июле, то средняя ожидаемая плата за установленную мощность составит 147 925,09 руб./(МВт · мес), что составляет 205,3 руб./(МВт · ч)*. При отключении генератора по причине возникновения асинхронного хода повторное включение возможно, как правило, не ранее чем через 0,5 ч, так как требуется осмотр отключенного оборудования оперативным персоналом, доклад о ситуации системному оператору, анализ ситуации, получение и реализация команды на повторное включение генератора. Исходя из того, что по результатам моделирования в опасной зоне с меньшими по отношению к нормативным угловым запасам устойчивости находились восемь генераторов, штрафные санкции в случае их отключения составили бы с учетом величины установленной мощности каждого генератора

* ФЕРп 81-05-02—2001. Сб. 2. Автоматизированные системы управления.
URL: <https://www.files.stroyins.ru>.

Об утверждении цен (тарифов) на электрическую энергию (мощность), поставляемую в ценовых зонах оптового рынка субъектами оптового рынка производителями электрической энергии (мощности) по договорам, заключенным в соответствии с законодательством Российской Федерации с гарантирующими поставщиками (энергоснабжающими организациями, энергосбытовыми организациями, к числу покупателей электрической энергии (мощности) которых относятся население и (или) приравненные к нему категории потребителей), в целях обеспечения потребления электрической энергии населением и (или) приравненными к нему категориями потребителей, а также с определенными Правительством Российской Федерации субъектами оптового рынка покупателями электрической энергии (мощности), функционирующими в отдельных частях ценовых зон оптового рынка, для которых Правительством Российской Федерации установлены особенности функционирования оптового и розничных рынков, на 2025 год: приказ ФАС России от 11.12.2024 № 992/24. URL: <https://fas.gov.ru/documents/689911>.

125,5 МВт 103 060,60 руб. То есть в случае использования предлагаемой системы возможная экономия может быть равной 103 060,60 руб.

Расчет затрат на реализацию проекта составлен по данным внедрения аналогичного проекта по внедрению автоматизированной диагностической системы, реализованной на Волжской ГЭС в 2019 г., с учетом коррекции цен на 2025 г. с уменьшенным количеством информационных каналов. Кроме того, коррекции подверглись также общие трудозатраты с учетом монтажа необходимого оборудования на одном рабочем месте вместо применявшегося расчета для 22 рабочих мест по количеству гидроагрегатов.

Расчет на реализацию предлагаемого проекта «под ключ» выполнен с применением специального программного обеспечения («Гранд-Смета»), с подключенными актуальными сметными нормативами [10]. Согласно данному расчету, общие затраты на реализацию предлагаемого проекта составят 492 512,52 руб. Таким образом, срок окупаемости проекта составит 4,78 года, что меньше нормативного срока окупаемости малых инвестиционных проектов, установленного в группе «РусГидро», — 7 лет [11, 12].

Выводы

Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Результатом выполненного анализа состава и параметров генерирующего оборудования Волжской ГЭС, оборудования части электроэнергетической системы, через которую выдается генерируемая мощность Волжской ГЭС и факторов, послуживших причиной аварийной ситуации в энергосистеме юга в июле 2024 г., стала разработка математической модели определения величин перетоков мощности в части электроэнергетической системы, через которую выдается генерируемая мощность Волжской ГЭС.

2. Разработанная математическая модель позволила проанализировать условия устойчивости генерирующего оборудования Волжской ГЭС при работе в утяжеленных режимах, а также сформулировать рекомендации по использованию разработанной модели в целях снижения вероятности отключения генерирующего оборудования Волжской ГЭС по причине асинхронного хода гидрогенераторов.

3. Определен ожидаемый экономический эффект от применения разработанной математической модели, который составил экономию 103 060,60 руб.

4. Произведено технико-экономическое обоснование предлагаемого решения по использованию разработанной модели, со сроком окупаемости 4,78 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Байков В. Н., Волков А. В. Влияние режимов регулирования частоты и мощности на техническое состояние гидроагрегатов ГЭС // Надежность и безопасность энергетики. 2022. Т. 15 № 1. С. 23—30.
2. Солодовников Д. А., Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Гидрологическая ситуация на водохранилищах юга европейской части России в 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 248—254.
3. Стебо А. С., Кутляров А. Н. Аварии на гидротехнических сооружениях // Инновационные технологии и технические средства для АПК : в 2 ч. : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, посвящ. 110-летию ФГБОУ ВО «Воронежский

государственный аграрный университет имени императора Петра I». Воронеж : Воронеж. гос. аграр. ун-т им. Императора Петра I, 2022. С. 414—418. EDN: QNOJRI.

4. Филиппова Т. А., Мисриханов М. Ш., Сидоркин Ю. М., Русина А. Г. Гидроэнергетика. 3-е изд., перераб. Новосибирск : НГТУ, 2013. 621 с. URL: <http://lib.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436213>.

5. Рябинина Н. О. Классификация напряженных геозкологических ситуаций и их ландшафтная обусловленность (на примере Волгоградской области) // Природные системы и ресурсы. 2022. Т. 12. № 2. С. 51—58. DOI: 10.15688/nsr.jvolsu.2022.2.7.

6. Хаванская Н. М., Аляев А. В., Семенова Д. А. Геоинформационный анализ потенциала человеческих ресурсов аграрных территорий Волгоградской области // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Экономика. 2020. Т. 22. № 2. С. 109—118. DOI: 10.15688/ek.jvolsu.2020.2.10.

7. Олянский Ю. И., Щекочихина Е. В., Карапузова Н. Ю., Татаркин А. В. К вопросу о региональных инженерно-геологических особенностях просадочных грунтов при гидротехническом и мелиоративном строительстве // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архитектура. 2024. Вып. 2(95). С. 24—33. DOI: 10.35211/18154360_2024_2_24. EDN: CPKOMR.

8. Automatic system for failure detection in hydro-power generators / L. C. Ribeiro, L. E. de Oliveira, L. de Bonaldi et al. // Power and Energy Engineering. 2014. Vol. 2. Pp. 36—46. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.24006>.

9. Инженерно-геофизические исследования состояния грунтовой плотины на реке Чермоз (Пермский край) / А. В. Татаркин, П. А. Красильников, Ю. И. Олянский и др. // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архитектура. 2025. Вып. 2(99). С. 25—39. DOI: 10.35211/18154360_2025_2_25. EDN: RXMERT.

10. Байков В. Н., Волков А. В. Анализ возможных ограничений по привлечению гидроагрегатов действующей ГЭС к АВРЧМ // Насосы, турбины, системы. 2021. № 4(41). С. 12—16.

11. Обеспечение экологической безопасности объектов гидромелиорации на структурно-неустойчивых грунтах в южных регионах Республики Молдовы / В. Н. Синяков, Ю. Л. Беляева, О. Г. Бражников и др. // Интернет-вестн. ВолгГАСУ. 2013. № 3(28). С. 14. EDN: RZJFZD.

12. Сидорова Е. В. Эколого-геологические проблемы при возведении гидротехнических сооружений // Актуальные проблемы экологии и природопользования : сб. науч. тр. XXII Междунар. науч.-практ. конф. : в 3 т. Т. 2. М. : РУДН, 2021. С. 523—527. EDN: WHPFIT.

© Трохимчук М. В., Гершман К. А., Шамигулова Д. П., Чурикова В. И., Гершман А. В., 2026

Поступила в редакцию
16.03.2026

Ссылка для цитирования:

Исследование устойчивости оборудования Волжской гидроэлектростанции в условиях утяжеленных и аварийных режимов оперативного диспетчерского управления юга / М. В. Трохимчук, К. А. Гершман, Д. П. Шамигулова, В. И. Чурикова, А. В. Гершман // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 3(104). С. 134—145. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_134.

Об авторах:

Трохимчук Марина Викторовна — канд. геол.-минер. наук, доц. каф. энергетики, филиал МЭИ в г. Волжском. Российская Федерация, 404110, г. Волжский, пр-т Ленина, 69; tro232957@mail.ru

Гершман Катерина Алексеевна — канд. техн. наук, доц. каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; katya.guseva/1980@list.ru

Шамигулова Дарья Петровна — студентка, филиал МЭИ в г. Волжском. Российская Федерация, 404110, г. Волжский, пр-т Ленина, 69

Чурикова Валерия Игоревна — канд. техн. наук, старший преподаватель каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; vachurikova@yandex.ru

Гершман Антон Владимирович — начальник производственного отдела обустройства месторождений и ремонта, ООО «РИТЭК». Российская Федерация, 400048, г. Волгоград, ул. Лесогорская, 85; Gersman.av@gmail.com

**Marina V. Troximchuk^a, Katerina A. Gershman^b, Dar'ya P. Shamigulova^a,
Valeriya I. Churikova^b, Anton V. Gershman^c**

^a Branch MEI, Volzhskii

^b Volgograd State Technical University

^c JCS "RITEK"

STUDY OF EQUIPMENT STABILITY AT THE VOLGA HYDROELECTRIC POWER PLANT UNDER SEVERE AND EMERGENCY CONDITIONS OF THE SOUTH ONE-DEPTH TRANSMISSION SYSTEM

This paper presents an assessment of the load distribution on the generating equipment. An analysis of the static stability margin of the electrical equipment is conducted. A mathematical model is developed to determine the impact of meteorological conditions on the generating equipment load in order to identify the accumulated static stability margins of the generating equipment and transmission lines. The expected economic impact of using the developed mathematical model is calculated.

Key words: hydroelectric power plant, electrical equipment, mathematical model, loads, severe and emergency conditions.

For citation:

Troximchuk M. V., Gershman K. A., Shamigulova D. P., Churikova V. I., Gershman A. V. [Study of equipment stability at the Volga hydroelectric power plant under severe and emergency conditions of the south one-depth transmission system]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 3, pp. 134—145. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_134.

About authors:

Marina V. Troximchuk — Candidate of Geol.-Miner. Sciences, branch MEI, Volzhskii. 69, Lenina ave., Volzhskii, 404110, Russian Federation; tro232957@mail.ru

Katerina A. Gershman — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; katya.guseva/1980@list.ru

Dar'ya P. Shamigulova — Student, branch MEI, Volzhskii. 69, Lenina ave., Volzhskii, 404110, Russian Federation

Valeriya I. Churikova — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; vachurikova@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-4807-9953

Anton V. Gershman — Head of the Production Department for Field Development and Repairs, JCS "RITEK". 85, Lesogorskaya st., Volgograd, 400048, Russian Federation; Gersman.av@gmail.com