

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УСПЕШНОГО ЗАПУСКА ЭНЕРГОБЛОКА ПГУ ОТ АВАРИЙНОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В.В. Жуков¹, И.А. Евсюков¹, А.С. Александров²

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия

²АО «Институт Теплоэлектропроект», г. Москва, Россия

Резюме: Аварии в энергосистеме могут привести к длительному отключению электростанции от энергосистемы и последующему их автономному пуску. Основная трудность пуска электростанции связана с запуском двигателей собственных нужд (с.н.) от независимого источника энергии, например, аварийной дизельной электростанции (АДЭС). Номинальную мощность генераторов АДЭС выбирают в соответствии с их расчетной нагрузкой, определяемой суммой мощностей всех электроприемников с.н. энергоблока ПГУ с учетом соответствующих коэффициентов загрузки и одновременности.

Однако, как показывает опыт эксплуатации ПГУ, выбранная таким образом мощность АДЭС не всегда обеспечивает успешный запуск энергоблока "с нуля". Так, выбранная мощность АДЭС для энергоблока ПГУ-450Т Калининградской ТЭЦ-2 (КТЭЦ-2) при аварии в энергосистеме в 2011 г. не обеспечила запуск энергоблока ПГУ-450Т. В этой связи возникает необходимость проведения исследований, позволяющих определить условия успешного запуска "с нуля" энергоблока ПГУ.

Сущность проблемы заключается в определении такой мощности АДЭС, которая сможет обеспечить допустимое снижение напряжения на шинах АДЭС при запуске потребителей с.н. ПГУ при различной комбинации относительного состава запускаемых электродвигателей механизмов с.н. ПГУ, а также минимальные капиталовложения в АДЭС.

Разработана методика определения мощности аварийной дизельной электростанции (АДЭС), обеспечивающей запуск потребителей собственных нужд (с.н.) при пуске «с нуля» энергоблока ПГУ. Расчетная методика учитывает переходные процессы в дизельном двигателе и синхронном генераторе с автоматической системой возбуждения при пуске от них асинхронных двигателей и тиристорного пускового устройства, а также расчетные критерии по обеспечению минимального напряжения в цепи АДЭС для успешного запуска и самозапуска потребителей с.н.

Выполненные расчетные исследования запуска энергоблока ПГУ-450Т позволили определить оптимальную мощность АДЭС и при различных условиях пуска потребителей с.н. показали, что прямой одновременный пуск потребителей с.н. энергоблока ПГУ при давлении газа в магистрали выше 2,3 МПа осуществляется успешно, однако пуск потребителей с.н. при давлении газа ниже 2,3 МПа (с учетом ГДК) возможен только при каскадном пуске потребителей с.н.

Ключевые слова: энергоблок ПГУ, аварийная дизельная электростанция, запуск энергоблока ПГУ «с нуля», потребители собственных нужд.

DETERMINATION OF CONDITIONS FOR THE SUCCESSFUL START-UP OF
COMBINED CYCLE POWER PLANT (CCPP) FROM BLACK START DIESEL
GENERATORS (BSDG)

V.V. Zhukov¹, I.A. Evsyukov¹, A.S. Alexandrov²

"National Research University" Moscow Power Engineering Institute ", Moscow,
Russia

JSC "Institute Teploelectroproekt", Moscow, Russia

Abstract: Failures in energy systems can cause disconnection of power plant from power system for an extended period of time and subsequent autonomous start-up of power plant. The main difficulty of power plant start-up is associated with the launch of auxiliary motors from an independent power source, for instance, Black Start Diesel Generators (BSDG). Rated power of BSDG is selected in accordance to estimated loads determined by the sum of the capacities of all auxiliary loads of CCPP taking into account load factor and simultaneity factor.

However, as the experience of operating of CCPP shows, the power of BSDG selected in this way does not always ensure a successful start-up of CCPP. Thus, selected power of BSDG for CCPP-450T unit of Kaliningradskaya Thermal Power Plant 2 didn't bring CCPP-450T unit into operation during black out in 2011. In this regard, there is a need to conduct a research to determine the conditions for successful start-up of a CCPP unit.

The essence of the problem lies in the determination of BSDG power capacity sufficient to provide an allowable voltage drop on the BSDG buses at the start of supplying auxiliary loads (with different auxiliary motors) of CCPP, as well as the determination of minimum cost of BSDG.

A technique for determining BSDG power capacity sufficient to supply power to auxiliary loads at the start-up of CCPP has been developed. This technique takes into account transient processes in diesel engine and synchronous generator with excitation system when those trigger asynchronous motors and a thyristor starting devices. Moreover, the technique takes into account criteria for maintaining the minimum voltage level at BSDG buses for successful supplying of auxiliary loads.

Performed research of CCPP-450T start-up process made it possible to determine the optimum power of BSDG and under various conditions for the start-up of auxiliary motors showed a direct simultaneous start-up of all auxiliary motors of CCPP unit with gas pressure in the pipeline above 2.3 MPa to be successful. However, start-up of auxiliary motors with gas pressure below 2.3 MPa (taking into account gas booster compressor) is possible only with sequentially developing start-up of auxiliary motors.

Keywords: Combined Cycle Power Plant (CCPP), Black Start Diesel Generators (BSDG), start-up of a CCGT, auxiliary load.

В условиях работы современных энергосистем существует вероятность системных аварий, приводящих к длительному отключению электростанций от энергосистемы и последующему автономному пуску. Такая проблема возникла при аварии в Московской энергосистеме в 2005 г., когда в течение 8 минут от сети было отключено 28 турбогенераторов в юго-восточной и южной частях энергосистемы [1, стр. 69–73]. При аварии в энергосистеме Калининградской области в 2011 г. остались без напряжения западная часть энергосистемы Калининградской области и прекратилась выработка электроэнергии Калининградской ТЭЦ-2 с потерей собственных нужд энергоблоков ПГУ-450Т. Основная трудность пуска электростанции связана с запуском двигателей собственных нужд (с.н.) от независимого источника энергии. В качестве независимого источника может быть использована резервная аварийная электростанция на базе дизельных, газотурбинных или газопоршневых установок. Анализ характеристик установок для обеспечения останова и запуска "с нуля" энергоблоков ПГУ большой мощности (время набора нагрузки с холостого

хода, время пуска, КПД, прием нагрузки при пуске и др.) выявил преимущества дизельных электростанций для запуска.

Обычно на электростанциях с энергоблоками ПГУ предусмотрены дизельные электростанции, мощность которых зависит от мощности энергоблока и составляет 500 – 1500 кВт. Они предназначены для обеспечения электроснабжения с.н. энергоблока только при его аварийном отключении (останов). Запуск энергоблока осуществляется от источников энергосистемы.

Для электростанций, имеющих слабую связь с ЕЭС, предусматривается пуск от аварийной дизельной электростанции (АДЭС), имеющей значительно большую мощность, чем электростанции для останова, как это выполнено на Калининградской ТЭЦ-2 и Сочинской ТЭС [2, стр. 6–8].

Номинальную мощность генераторов АДЭС выбирают в соответствии с их расчетной нагрузкой, определяемой суммой мощностей всех электроприемников с.н. энергоблока ПГУ с учетом соответствующих коэффициентов загрузки и одновременности. Определение расчетной нагрузки удобно вести в форме таблицы. Для примера в табл. 1 приведен подсчет нагрузки с.н. на напряжении 10 кВ энергоблока ПГУ-450Т при давлении в газопроводе менее 2,33 МПа, что требует установки газового дожимного компрессора мощностью 6200 кВт.

Таблица 1

Состав потребителей с.н. энергоблока ПГУ-450Т при давлении в газопроводе менее 2,33 МПа

№	Наименование потребителей	Очередность включения	U,кВ	P, кВт	I,А
1	Циркуляционный насос	9	6,0	1400	130
2	Конденсатный насос	10	6,0	400	20
3	Насос бака запаса конденсата	11	0,4	45	80
4	Насос контура охлаждения	12	0,4	30	56
5	ПЭН ВД	13	6,0	790	70
6	ПЭН НД	14	0,4	22	36
7	Насос гидроподъема	7	0,4	28	22
8	Насос системы смазки ГТУ	6	0,4	48	39
9	Насос охлаждения генератора	17	0,4	225	200
10	Насос системы регулирования	15	0,4	7	11
11	Насос системы регулирования	5	6,0	137	14
12	Насос гидроподъема	3	0,4	30	50
13	Насос смазки ПТ	2	0,4	37	60
14	Валоповорот ПТ	4	0,4	24	39
15	Оборудование ЦТАИ	1	0,4	200	
16	Оборудование БППГ	8	0,4	130	210
17	Насосная 2-го подъема	16	6,0	120	11

Продолжение таблицы 1

18	Сеть освещения (без АБК и ИЛК)	18	0,4	380	-
19	ВПУ	19	6,0	450	43
20	Газовый дожимной компрессор	20	6,0	6200	500
21	Тиристорное пусковое устройство ГТУ	21	6,0	6200	-
	Итого	-	-	16900	-

Однако, как показывает опыт эксплуатации ПГУ, выбранная таким образом мощность АДЭС не всегда обеспечивает успешный запуск энергоблока "с нуля". Так, выбранная мощность АДЭС для энергоблока ПГУ-450Т Калининградской ТЭЦ-2 (КТЭЦ-2) при аварии в энергосистеме в 2011 г. не обеспечила запуск энергоблока ПГУ-450Т.

Особенностью рассматриваемого процесса запуска механизмов с.н. от АДЭС при пуске ПГУ "с нуля" является то, что основной состав нагрузки имеет двигательный характер, мощность её соизмерима с мощностью генераторов АДЭС, и суммарный пусковой ток электродвигателей превосходит номинальный ток генераторов, что приводит к снижению напряжения на выводах. Учитывая, что асинхронный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения, снижение напряжения может привести к ситуации, когда вращающий момент двигателя окажется меньше момента сопротивления механизма и частота вращения уменьшится.

Поэтому напряжение на выводах пускаемого двигателя должно быть достаточным, чтобы обеспечить положительный избыточный момент в течение всего процесса разгона, при допустимом нагреве обмоток.

В этой связи критерием оценки устойчивой работы принято допустимое снижение напряжения на выводах генераторов АДЭС при пуске электродвигателей механизмов с.н.

Сущность проблемы заключается в определении такой мощности АДЭС, которая сможет обеспечить снижение напряжения на шинах АДЭС, допустимое для запуска потребителей с.н. ПГУ при различной комбинации относительного состава запускаемых электродвигателей механизмов с.н. ПГУ, а также минимальных капиталовложений в АДЭС.

Особенности пуска двигательной нагрузки от автономных источников, а именно дизельгенераторов соизмеримой мощности, для электродвигателей большой мощности (более 1000 кВт) рассмотрены в публикациях недостаточно. Основное внимание уделено исследованию электроприводных систем малой и средней мощности [3, 4]. В известной работе [5] рассмотрено питание мощных двигателей от генераторов соизмеримой мощности, однако особенности пуска асинхронных двигателей большой мощности от дизельной электростанции не рассмотрены. Обзор зарубежных публикаций выявил, что иностранные фирмы-производители оборудования гарантируют допустимую перегрузку генераторов при пуске асинхронных двигателей по пусковому току не более 10% в течение часа, или рекомендуемая нагрузка должна составлять 37–75% от мощности генератора.

В качестве примера в статье рассмотрен случай использования дизель-генераторов фирмы *Caterpillar*, установленных на Калининградской ТЭЦ-2. Для условий ПГУ-450Т на основании данных о составе потребителей с.н. (табл. 1) рассмотрены следующие возможные варианты исполнения АДЭС (табл. 2).

Таблица 2

Варианты исполнения АДЭС				
№ п.п	Мощность генератора, кВт	Количество генераторов, шт	Мощность АДЭС, кВт	Отношение кап. затрат, %
1	2860	5	14300	117
2	4300	4	17200	111
3	5720	3	17160	100

С учетом минимальных капиталовложений и повышенной надежности (число генераторов) принята АДЭС, состоящая из трёх генераторов мощностью 5720 кВт каждый, при общей мощности АДЭС 17160 кВт. Такой вариант исполнения является наиболее приемлемым с точки зрения капитальных затрат, однако требует проверки устойчивости работы генераторов АДЭС, которая определяется условиями успешного пуска потребителей с.н. (асинхронные двигатели). Учитывая вышесказанное, возникла необходимость разработки расчетной методики по определению провалов напряжения в цепи генераторов АДЭС при запуске ПГУ "с нуля". Расчетная схема автономной системы с потребителями с.н. энергоблока ПГУ-450Т показана на рис. 1.

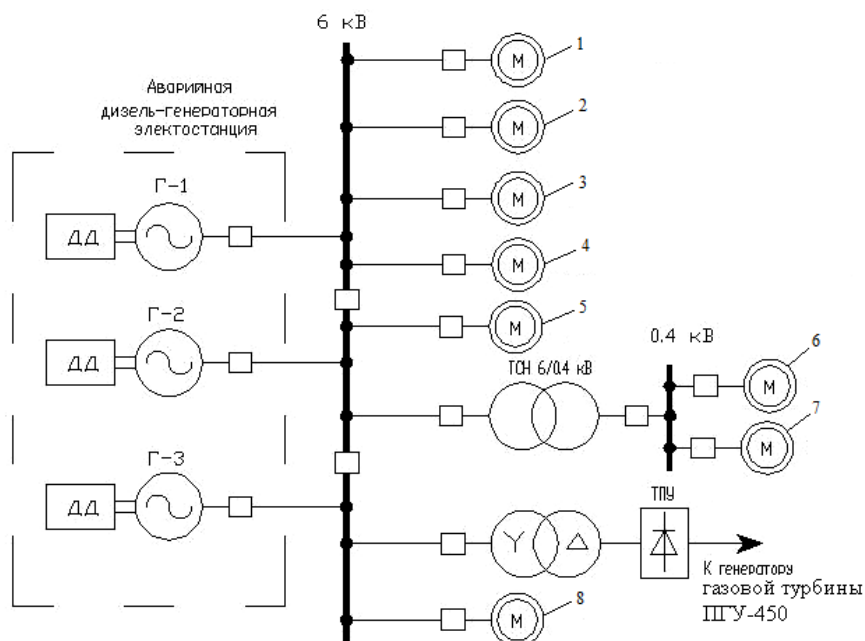


Рис. 1. Расчетная схема автономной системы с потребителями с.н. энергоблока ПГУ-450Т:
 ДД – дизельный двигатель; Г-1, Г-2, Г-3 – генераторы АДЭС; 1 – циркуляционный насос;
 2 – конденсатный насос; 3 – питательный электронасос высокого давления; 4 – эквивалентная
 двигательная нагрузка других двигателей с.н.; 5 – газовый дожимной компрессор; 6 – эквивалентная
 двигательная нагрузка; 7 – насос системы регулирования; 8 – валоповоротное устройство

При исследовании пуска электродвигателя в автономных системах ограниченной мощности представляет интерес прежде всего переходный процесс в дизельном двигателе и генераторе, электрохимический переходный процесс в электродвигателе в этом случае

незначительно влияет на процесс пуска вследствие демпфирующего действия процесса в генераторе. Упрощенная расчетная схема запуска энергоблока ПГУ показана на рис. 2.

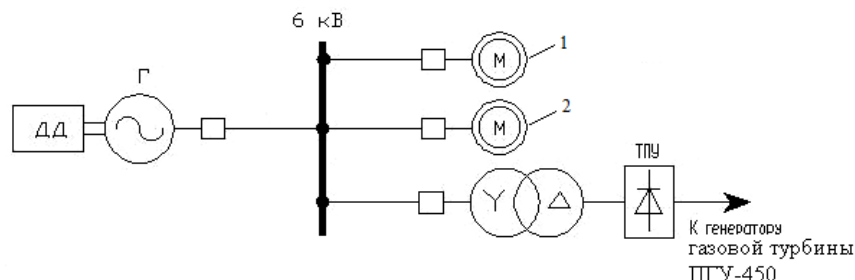


Рис. 2. Упрощенная расчетная схема запуска энергоблока ПГУ: Г – генератор АДЭС; ДД – дизельный двигатель; 1 – эквивалентный асинхронный двигатель нагрузки с.н. (ЭАД); 2 – асинхронный двигатель газодожимного компрессора (АД ГДК); ТПУ – тиристормое пусковое устройство ГТУ

Анализ изменения сопротивления и огибающих амплитудных значений тока асинхронного двигателя в процессе разгона показывает [5, 6], что пусковой ток двигателя снижается, а сопротивление электродвигателя возрастает только в конце пуска, поэтому их можно считать примерно неизменными в течение всего периода разгона, что позволяет для анализа электромеханических переходных процессов использовать математические выражения, описывающие квазиустановившиеся режимы.

Эта особенность позволяет рассматривать включение нагрузки с.н. на зажимы генератора как нагрузки, эквивалентной приведенному сопротивлению короткого замыкания эквивалентного асинхронного двигателя $Z_{\text{ЭАД}}$ (отн. ед.) [5]:

$$Z_{\text{ЭАД}} = \frac{(\eta_{\text{Д}} \cos \varphi_{\text{ЭАД}} \cdot P_{\text{Г}})}{(k_{\text{Г}} \cdot \cos \varphi_{\text{Г}} \cdot P_{\text{Д}})} \cdot \left(\frac{U_{\text{Д}}}{U_{\text{Г}}} \right)^2,$$

где $\eta_{\text{Д}}$ – КПД электродвигателя, отн. ед.; $k_{\text{Г}}$ – кратность пускового тока ЭАД, отн. ед.; $\cos \varphi_{\text{Г}}$, $\cos \varphi_{\text{ЭАД}}$ – номинальное значение коэффициента мощности генератора и пусковое значение коэффициента мощности электродвигателя; $U_{\text{Г}}$, $U_{\text{Д}}$ – напряжение на зажимах генератора и электродвигателя, кВ; $P_{\text{Г}}$, $P_{\text{Д}}$ – номинальная мощность генератора и эквивалентного электродвигателя, кВт.

Пусковое значение коэффициента мощности эквивалентного асинхронного двигателя (ЭАД) определено по значению критического скольжения $s_{\text{кр}}$, которое можно найти исходя из механической характеристики асинхронного двигателя в виде электрического момента $m_{\text{Д}}$ [5]:

$$m_{\text{Д}} = \frac{2 \cdot m_{\text{max,Д}} \cdot (1 + C_{\text{Г}})}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}} + 2 \cdot C_{\text{Г}}},$$

где $C_{\text{Г}} = \frac{r_1}{r_2'} \cdot s_{\text{кр}}$; $m_{\text{Д}}$ – электрический момент электродвигателя, отн. ед.; $m_{\text{max,Д}}$ – максимальный момент электродвигателя, отн. ед.; s – скольжение, отн. ед.; $s_{\text{кр}}$ – критическое скольжение, отн. ед., определяется в соответствии с [5].

Для оценки максимального отклонения частоты вращения дизель-генераторного агрегата при подключении двигательной нагрузки введён коэффициент λ , отн. ед., равный отношению изменения нагрузки на валу двигателя к величине его максимального момента:

$$\lambda = 1,36 \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2 \cdot \cos \varphi_{\text{ЭАД}}}{Z_{\text{ЭАД}} \cdot \eta_{\Gamma} \cdot \cos \varphi_{\Gamma}} \cdot \left(\frac{P_{\Gamma}}{P_{\text{Д}}} \right),$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение ЭАД, отн. ед.

Максимальное отклонение частоты вращения генератора φ_{max} , которое имеет место в первый полупериод колебания частоты, определяется по экстремальным точкам графика оценки параметров механического процесса генераторного агрегата при пуске от него асинхронного короткозамкнутого электродвигателя [6] для моментов времени $t=0$ и

$$t_m = \frac{1}{\beta} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \psi - \psi_0 \right), \text{ где } \psi_0 = \tan^{-1} \frac{\beta}{\alpha}; \quad \psi = \tan^{-1} \frac{1 - \alpha \cdot \alpha_0}{\beta \cdot \alpha_0},$$

$$\text{а именно: } \varphi_{\text{max}} = \rho \cdot \lambda \cdot \delta \cdot \left[e^{-\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\pi}{2} - \psi - \psi_0 \right)} \cdot \sin \psi_0 + \cos \psi \right],$$

где

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{E_{\tau_{\text{д}}}}{2 \cdot D_{\text{д}}}; \quad \beta = \sqrt{\frac{1}{D_{\text{д}}} - \alpha^2}; \quad \rho = \sqrt{\left(\frac{1 - \alpha \cdot \alpha_0}{\beta \cdot \alpha_0} \right)^2 + 1}; \\ \alpha_0 &= \delta_r \cdot T_j; \quad E_{\tau_{\text{д}}} = \delta_r \cdot T_j \cdot (1 - \tau_p); \quad D_{\text{д}} = T_j \cdot T_k; \\ \tau_p &= \frac{30 \cdot (\alpha_0 + 0,872)}{\pi \cdot \delta_r \cdot n_{\text{ном}} \cdot T_j}; \quad T_j = \frac{CD^2}{P_{\text{max,Д}}} \cdot \left(\frac{n_{\text{ном}}}{518} \right), \end{aligned}$$

T_j – постоянная времени вращающихся масс агрегата, с; τ_p – время запаздывания регулирующего импульса, с; δ_r – степень неравномерности (статизм) регулятора, отн. ед.; T_k – постоянная времени катаракта регулятора частоты вращения, с; $\alpha_0 = 0,436$ – угол опережения впрыскивания топлива дизельного двигателя, отн. ед; T_{ψ} – постоянная времени графика, с, аппроксимирующего реальный график снижения частоты вращения дизельного двигателя при пуске потребителей собственных нужд энергоблока, определяется из равенства площадей, ограниченных расчетным и аппроксимирующим графиком изменения частоты вращения дизельного двигателя в интервале от 0 до t_m :

$$\int_0^{t_m} \varphi_{\text{max}} \cdot \sin \frac{\pi}{2 \cdot t_m} \cdot t dt = \int_0^{t_m} \varphi_{\text{max}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{T_{\psi}}} \right) \cdot t dt,$$

откуда

$$T_{\psi} = \frac{0,396}{\beta} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \psi - \psi_0 \right).$$

Таким образом, изменение частоты вращения генератора в рассматриваемом переходном процессе определяется выражением

$$\omega(t) = 1 - \varphi_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{T_{\psi}}} \right).$$

В системах ограниченной мощности переходный процесс для генератора с автоматическим регулятором возбуждения (АРВ) рассчитывается с помощью уравнения, характерного для систем ограниченной мощности:

$$\frac{dU}{dt} + k_2 \cdot U = k_1 \cdot [U_{\text{вmax}}(t) + U_{\text{вmax}} \cdot \varphi(t)],$$

где $U_{\text{вmax}}$ – максимальное напряжение возбудителя, В; k_1 и k_2 – коэффициенты, определенные с учетом параметров генератора и нагрузки; $\varphi(t)$ – изменение частоты вращения дизельного генератора учитывается формулой

$$\varphi(t) = \varphi_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{T_{\psi}}} \right),$$

где $\varphi_{\max}$ – максимальное отклонение частоты вращения генератора.

Прямое преобразование по Лапласу и обратное α - преобразование уравнения позволяет получить выражение изменения напряжения генератора с АРВ пропорционального действия с учетом влияния изменения частоты вращения дизельного двигателя:

$$\begin{aligned} U(t) = & U_{\text{вmax}} \cdot (1 - \varphi_{\max}) \cdot \frac{k_1}{k_2} + \\ & + \left[U_0 - U_{\text{вmax}} \cdot (1 - \varphi_{\max}) \cdot \frac{k_1}{k_2} + U_{\text{вmax}} \cdot \frac{k_1 + \varphi_{\max}}{k_{\psi} - k_2} \right] \cdot e^{-k_2 \cdot t} - \\ & - U_{\text{вmax}} \cdot \frac{k_1 + \varphi_{\max}}{k_{\psi} - k_2} \cdot e^{-k_{\psi} \cdot t}, \end{aligned}$$

где $k_{\psi} = \frac{1}{T_{\psi}}$; $U_{\text{вmax}} = \frac{1}{\gamma}$; $U_0 = \gamma' \cdot E'_d$; $k_1 = \frac{\gamma}{T_{d0}}$; $k_2 = \frac{\gamma'}{\gamma \cdot T_{d0}}$;

$$\gamma = \frac{Z_{\text{ЭАД}}}{\sqrt{\left(\frac{x_d}{3} + x_{\text{ЭАД}} \right)^2 + r_{\text{ЭАД}}^2}}; \quad \gamma' = \frac{Z_{\text{ЭАД}} \sqrt{(x_d + x_{\text{ЭАД}})^2 + (r_a + r_{\text{ЭАД}})^2}}{\left[(x'_d + x_{\text{ЭАД}})^2 + (x_d + x_{\text{ЭАД}}) + r_{\text{ЭАД}}^2 \right]},$$

U_0 – напряжение генератора в момент включения электродвигателя; x'_d – переходное индуктивное сопротивление генератора, отн. ед.; x_d – синхронное индуктивное сопротивление генератора, отн. ед.; $x_{\text{ЭАД}}$ – индуктивное сопротивление эквивалентного асинхронного двигателя, отн. ед.; r_a и $r_{\text{ЭАД}}$ – активные сопротивления генератора и ЭАД, отн. ед., E'_d – переходная ЭДС генератора по продольной оси, отн. ед. Поскольку максимальное напряжение возбуждения возбудителя 4 отн. ед., принимаем $U_{\text{вmax}} = 0,4$ отн. ед.

В рассматриваемой системе на электрический момент электродвигателя оказывает влияние провал напряжения на его выводах, а также снижение частоты напряжения в сети АДЭС из-за замедления вращения дизель-генераторного агрегата.

Пуск эквивалентного электродвигателя с.н. энергоблока ПГУ обеспечивается при условии, что его вращающий момент, зависящий от напряжения и частоты, превосходит значение момента сопротивления на его валу:

$$m_n(U, f) = m_n \frac{U^2}{f^2} m_{с.н.},$$

где m_n – кратность пускового момента по отношению к номинальному моменту электродвигателя при номинальных значениях напряжения и частоты, отн. ед.; $m_{с.н.}$ – начальный момент сопротивления механизма с.н., для вентиляторной нагрузки можно принять равным 0,15 отн. ед.

Допустимое снижение напряжения по условию разгона пускаемого электродвигателя определяется соотношением [5]

$$\Delta U_{\max} \leq \left(1 - f \cdot \sqrt{f \cdot \frac{m_{с.н.}}{m_n}} \right) \cdot 100\%,$$

где f – частота напряжения в сети (прямо пропорциональна угловой частоте вращения ω), которая снизилась в результате снижения частоты вращения ротора генератора из-за подключения нагрузки.

При расчете снижения напряжения вследствие подключения тиристорного пускового устройства (ТПУ) генератора ГТУ, его сопротивление определяется по выражению

$$Z_{ТПУ} = \frac{(P_{\Gamma} \cos \varphi_{ТПУ} \cdot P_{\Gamma})}{(k_i \cdot \cos \varphi_{\Gamma} \cdot P_{ТПУ})} \cdot \left(\frac{U_{\text{д}}}{U_{\Gamma}} \right)^2,$$

где $P_{ТПУ}$ – мощность ТПУ, кВт; $\cos \varphi_{ТПУ}$ – номинальное значение коэффициента мощности ТПУ, его можно принять в виде обобщенного значения равным 0,9.

При определении допустимого провала напряжения при подключении ТПУ необходимо оценивать допустимое снижение напряжения на шинах АДЭС с точки зрения обеспечения самозапуска уже работающих электродвигателей с.н.:

$$U_{\min} \geq f \cdot \sqrt{f \cdot \frac{m_{с.н.}}{m_n}} \cdot 100\%,$$

где значения $m_{с.н.}$ и m_n для работающих асинхронных двигателей.

На основании аналитических выражений методики разработан алгоритм выбора мощности АДЭС, обеспечивающий успешный пуск "с нуля" энергоблока ПГУ. Ниже приведены результаты расчета провалов напряжения для условий КТЭЦ-2 (табл. 3). Для запуска энергоблока ПГУ-450Т используется АДЭС мощностью 17160 кВт, состоящая из трех дизельгенераторов мощностью по 5720 кВт. При расчете рассмотрен состав потребителей с.н., указанный в табл. 1. В табл. 3 представлены результаты расчетов снижения напряжения и изменения частоты АДЭС в начальный момент прямого пуска потребителей различных составов с.н. в зависимости от вида топлива. В числителе приведены расчетные данные по запуску электродвигателей с.н., а в знаменателе – по запуску совместно с ТПУ. Адекватность разработанной методики подтверждена удовлетворительным совпадением результатов расчета по предлагаемой методике с результатами, полученными с помощью полной математической модели системы рис. 1 [7, стр. 45–52] и приведенных в скобках табл. 3. Погрешность расчета составила не более 3,0%.

Таблица 3

Результаты расчета изменения напряжений и частоты вращения АДЭС

№, состава с.н.	Вид топлива, определяющий состав потребителей с.н. (см. табл. 1).	Напряжение при пуске механизмов с.н. / ТПУ U , о.е.	Частота вращения АДЭС ω , о.е. при пуске механизмов с.н. / ТПУ
1	Природный газ при давлении более 2,33 МПа, без учета ГДК, табл. 1	0,853/0,883 (0,837/0,86)	0,922/0,945 (0,92/0,94)
2	Природный газ при давлении менее 2,33 МПа, с учетом ГДК, табл. 1	0,684/0,8 (0,68/0,78)	0,85/0,924 (0,856/0,923)
3	Мазут, (природный газ отсутствует)	0,84/0,882	0,91/0,942

На рис. 3 и 4 в качестве примера показаны расчетные кривые изменения напряжения и частоты вращения генераторов АДЭС при пуске электроприемников различного состава с.н. Кривые позволяют оценить не только провал напряжения в начальный момент пуска, но и характер изменения напряжения и частоты в течение времени пуска. Кривые рис. 3, отражающие пуск механизмов с.н. при давлении газа более 2,33 МПа, показывают, что в начальный момент времени пуска напряжение снижается до 0,853 от $U_{\text{ном}}$, снижение частоты вращения до 0,922 от $\omega_{\text{ном}}$. На рис. 4 показаны кривые изменения напряжения и частоты вращения генераторов АДЭС в режиме пуска потребителей с.н. ПГУ-450 с учетом ГДК. При пуске механизмов с.н., включая ГДК, напряжение снижается до 0,684 от $U_{\text{ном}}$, снижение частоты составляет 0,85 от $\omega_{\text{ном}}$. Как показывают расчётные кривые рис. 4, напряжение после падения возрастает незначительно, что обуславливается ограничением по напряжению возбуждения генератора.

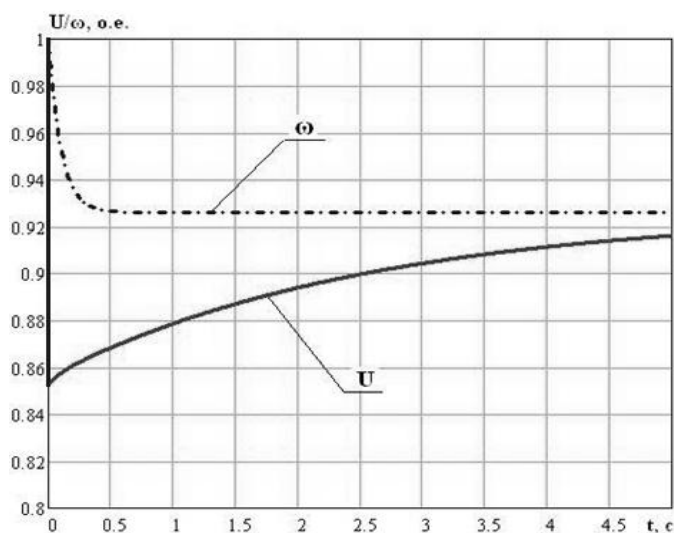


Рис. 3. Кривые изменения напряжения и частоты вращения АДЭС при пуске потребителей с.н. без учета ГДК

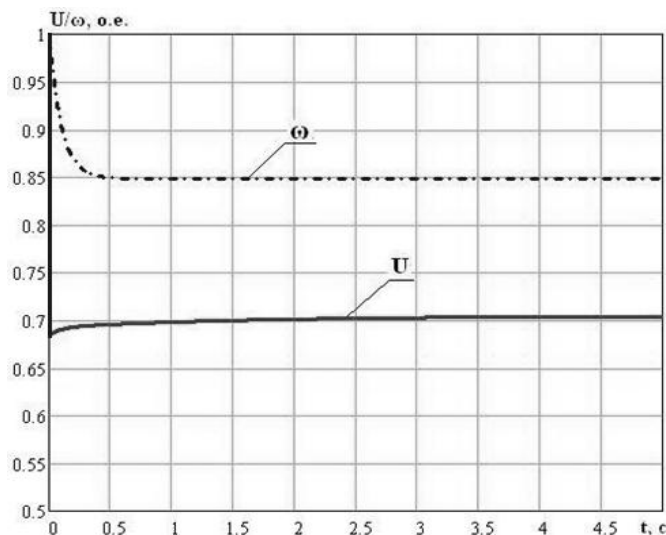


Рис. 4. Кривые изменения напряжения и частоты вращения АДЭС при пуске потребителей с.н. с учетом ГДК

Критическое напряжение $U_{кр}$ для двигателей собственных нужд, при котором опрокидываются ответственные механизмы с.н., определяется индивидуально для каждой группы асинхронных двигателей. В данном случае при составе потребителей с.н., включающем ГДК, допустимый провал напряжения составляет 20% от $U_{ном}$. Полученный при расчете провал напряжения (31,6% от $U_{ном}$) является недопустимым по условию устойчивой работы асинхронных двигателей.

Таким образом, выбранной мощности АДЭС не достаточно для обеспечения успешного запуска потребителей с.н. с учетом ГДК. Для обеспечения успешного пуска следует увеличить мощность АДЭС. В соответствии с табл. 2 можно принять АДЭС мощностью $4300 \times 5 = 21500$ кВт. Результаты расчетов снижения напряжения и частоты вращения генераторов принятой АДЭС показали, что в начальный момент времени при пуске потребителей с.н. с учетом ГДК напряжение снизилось до 0,732 от $U_{ном}$, то есть провал составляет $\Delta U = 26,8\%$, при этом допустимое снижение напряжения $\Delta U_{max} = 29,2\%$. Таким образом, выбранная АДЭС увеличенной мощности обеспечивает успешный пуск энергоблока ПГУ-450Т при всех составах с.н. Однако в реальных условиях не всегда имеется возможность увеличить мощность АДЭС, поскольку это приводит к увеличению капитальных затрат на ее строительство или, например, для случая КТЭЦ-2, когда АДЭС уже построена, увеличение ее мощности путем замены количества (мощности) дизельгенераторов невозможно.

В таком случае для обеспечения условий успешного пуска электродвигателей с.н. ПГУ-450 от АДЭС мощностью 17160 кВт предлагается снизить одновременную нагрузку на генераторы АДЭС с целью снижения пускового тока и провала напряжения, используя каскадный способ пуска потребителей с.н. Суть каскадного пуска заключается в разбиении потребителей на группы и их запуске в соответствии с технологической последовательностью включения, указанной в табл. 1.

При этом запуск потребителей каждой последующей группы осуществляется после достижения предыдущей нормального режима т.е. $I_{пуск} = I_{ном}$.

Так, при расчёте условий пуска при давлении газа в газопроводе меньше 2,33 МПа была принята следующая группировка потребителей:

- группа 1: все потребители с.н. (п. 1–19 табл. 1), кроме ГДК и ТПУ, мощностью $P_{с.н.гр1} = 4500$ кВт;

- группа 2: ГДК, $P_{ГДК} = 6200$ кВт;

- группа 3: ТПУ, $P_{ТПУ} = 6200$ кВт.

В результате расчета провалов напряжения и изменения частоты вращения при каскадном пуске потребителей с.н. от АДЭС при давлении газа в газопроводе менее 2,33 МПа получены данные, подтверждающие условия успешного пуска энергоблока ПГУ-450Т "с нуля" (табл. 4).

Таблица 4

Результаты расчета при каскадном пуске потребителей с.н.

Номер группы	Состав потребителей групп и их мощность	Напряжение U , отн.ед.	Частота вращения АДЭС ω , отн.ед.
1	Механизмы с.н., 4500 кВт	0,853	0,922
2	Газодожимной компрессор, 6200 кВт	0,76	0,879
3	ТПУ, 6200 кВт	0,8	0,945

Выводы

1. Разработана методика определения мощности АДЭС, обеспечивающей запуск потребителей с.н. при пуске «с нуля» энергоблока ПГУ. Расчетная методика учитывает переходные процессы в дизельном двигателе и синхронном генераторе с автоматической системой возбуждения при пуске асинхронных двигателей, а также расчетные критерии по обеспечению минимального напряжения в цепи АДЭС для успешного запуска и самозапуска потребителей с.н.

2. Выполненные расчетные исследования запуска энергоблока ПГУ-450Т от установленной на КТЭЦ-2 АДЭС при различных условиях пуска потребителей с.н. показали, что прямой одновременный пуск потребителей с.н. энергоблока ПГУ при давлении газа выше 2,3 МПа осуществляется успешно, однако пуск потребителей с.н. при давлении газа ниже 2,3 МПа (с учетом ГДК) – неуспешный и возможен только при каскадном пуске потребителей с.н.

3. Разработанная методика значительно упрощает определение необходимой мощности АДЭС для энергоблоков ПГУ и может быть рекомендована к использованию для упрощенных расчетов при проектировании комплекса мероприятий по обеспечению пуска ТЭС с энергоблоками ПГУ.

Литература

1. Коган Ф.Л. О причинах развития известной аварии в Московской энергосистеме // Электричество. 2008. № 5. С. 69–73.
2. Федотов М.В., Сиваков Л.И., Медведева Т.Г. Использование аварийной дизельной электростанции для пуска ТЭС «с нуля» // Газотурбинные технологии. 2009. № 6. Стр. 6–8.
3. Вершинин В.И., Алексеев В.В. Реакторный пуск асинхронных двигателей от автономных источников электрической энергии соизмеримой мощности. Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. – URL.
4. Майорова Ю.А. Пуск асинхронного двигателя в сети соизмеримой мощности // Наука, техника и образование. Издательство: Олимп (Иваново). 2012. № 10 (16). С. 131–134.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/ Под ред. Л.Г. Мамиконянца. 4-е изд., переработ. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

6. Яковлев Г.С. Судовые электроэнергетические системы. СПб: Изд. Судостроение, 1985.

7. Жуков В.В, Евсюков И.А., Александров А.С. Особенности пуска энергоблока ПГУ с помощью аварийной дизельной электростанции // Электрические станции. 2015. № 6. С. 45–52.

Авторы публикации

Жуков Василий Владимирович – докт. техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»). E-mail: zhukovvv@mail.ru.

Евсюков Иван Александрович – аспирант кафедры «Электрические станции» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»). E-mail: yevsyukov_ia@mail.ru.

Александров Анатолий Сергеевич – главный инженер проекта АО «Институт Теплоэлектропроект».

References

1. Kogan F.L. On the causes of the development of a known accident in the Moscow energy system .: Electricity No. 5, 2008. P. 69–73.

2. Fedotov M.V/, Sivakov L.I., Medvedeva T.G. Use of an emergency diesel power plant to start-up a EPP.: Gas Turbine Technologies, No. 6, 2009. P. 6–8.

3. Vershinin V.I., Alekseev V.V. Reactor start-up of asynchronous engine from autonomous sources of electrical energy of commensurate power. Online Electric: Power. New technologies, 2012. URL.

4. Mayorova Yu.A. Start-up of asynchronous engine in a system of commensurate capacity: Science, technology and education. Publisher: Olimp (Ivanovo), № 10 (16), 2012, P. 131–134.

5. Syromyatnikov I.A. Modes of operation of asynchronous and synchronous engines / Ed. L.G. Mamikonyants. – 4 th ed. – М.: Energoatomizdat, 1984. 240 p.

6. Yakovlev G.S. Ship electric power systems .: SP-B Izd. Shipbuilding, 1985.

7. Zhukov V.V., Evsyukov I.A., Aleksandrov A.S. Features of the start-up of the CCGT unit with the help of an emergency diesel power plant.: Electric Power Plant, No. 6, 2015. P. 45–52.

Authors of the publication

Vasily V. Zhukov – doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Electric Power Plant of the Moscow Power Engineering Institute. E-mail: zhukovvv@mail.ru.

Ivan A. Evsyukov – postgraduate at the Department of Electric Power Plant of the Moscow Power Engineering Institute. E-mail: yevsyukov_ia@mail.ru.

Anatoly S Aleksandrov – Chief Engineer of the project JSC "Institute Teploelectroproekt".

Поступила в редакцию

13 апреля 2017 г.