

Математическое моделирование солнечно-дизельных комплексов

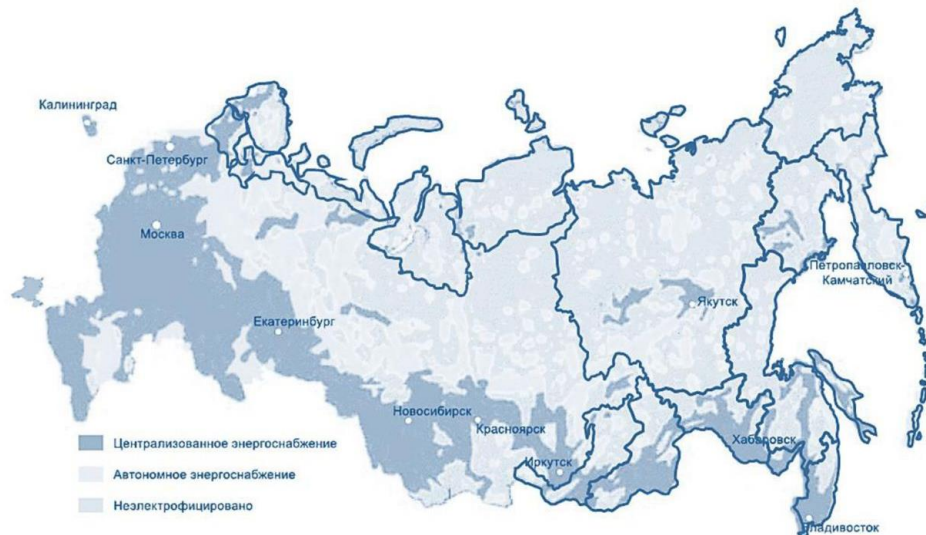
Андреева К.А.,
Васильева А.А.,
Васьков А.Г.,
Ладанов Л.О.,
Шуркалов П.С.

10.11.23

Лаборатория СУ СДК

Постановка проблемы

Изолированные объекты генерации существуют в 23 регионах России. Генерирующее оборудование - ДЭС.



[1] Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России: аналитический доклад, март 2020 / Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2020. 78 с.

[2] https://nedradv.ru/nedradv/ru/page_industry?obj=541043ec87966411dd6058fbf1751b85

Постановка проблемы



Для снижения объёмов потребления дизельного топлива возможно:

- проводить модернизацию устаревшего оборудования
- внедрять энергосберегающие технологии
- использовать вспомогательное оборудование на базе ВИЭ, а также СНЭ

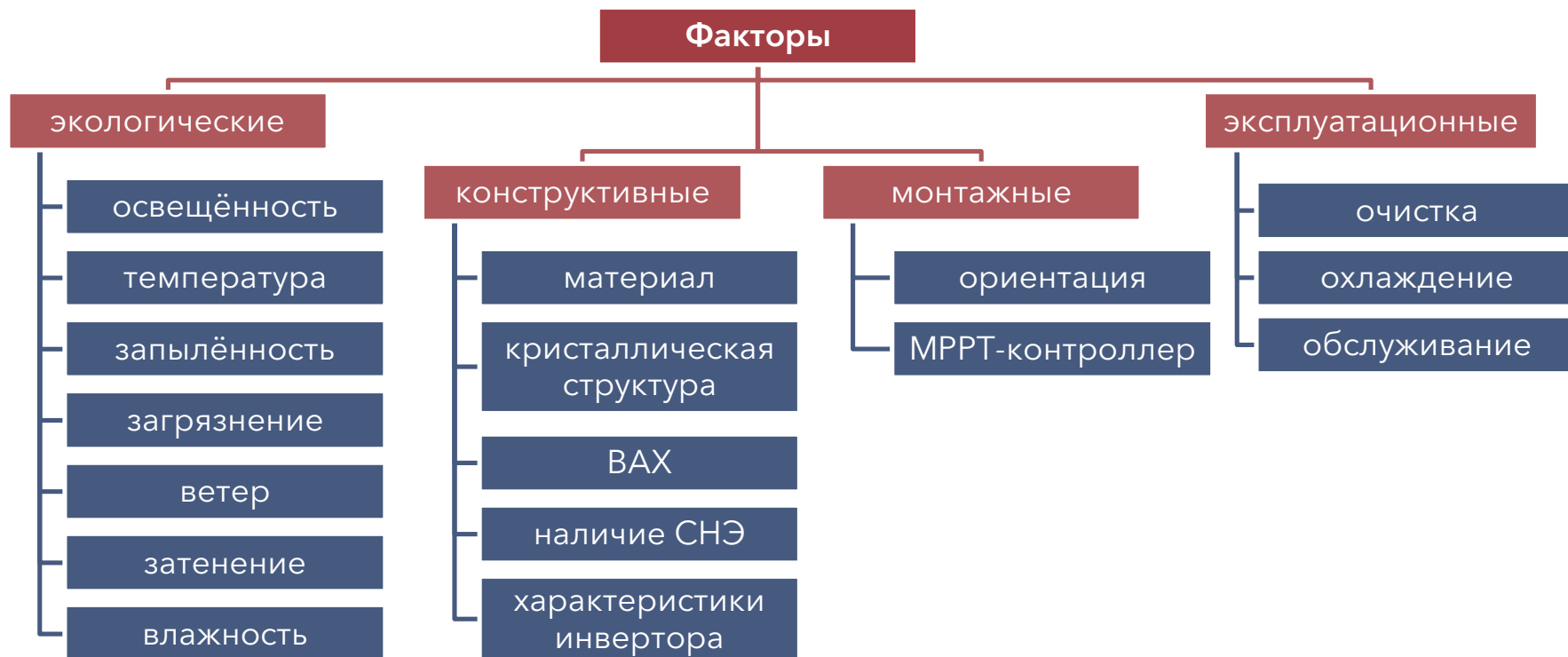
Структурная схема процесса моделирования работы СДК



Моделирование СФЭМ



Факторы



Моделирование СФЭМ



Выработка электроэнергии СФЭМ:

$$P = V_M \cdot I_M = FF \cdot V_{XX} \cdot I_{K3}$$

Температуру модуля можно рассчитать как:

$$T_{\text{модуль}} = T_{\text{о.с}} + R \cdot \exp(-a - b \cdot v_B) + \Delta T \cdot \frac{R}{1000},$$

где a , b и ΔT - константы, для стекла, ячейки и полимерного листа равны 3,56; 0,0750 и 3 о.е. соответственно; v_B - скорость ветра (м/с); $T_{\text{о.с}}$ - температура окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$); R - солнечное излучение ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Относительные годовые потери энергии от самозатенения:

$$RAEL = A \cdot e^{-2,3F} - 0,001 \cdot F + 0,01,$$

где A - параметр потери энергии (о.е.); F - коэффициент, учитывающий расстояние между солнечными модулями ($1,5 \text{ о.е.} < F < 5 \text{ о.е.}$).

[3] Dubey S., Sarvaiya J.N., Seshadri B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World - A Review // Energy Procedia. Elsevier BV, 2013. Vol. 33.

[4] Abiola-Ogedengbe A., Hangan H., Siddiqui K. Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module // Renew. Energy. 2015. Vol. 78. P. 657-665.

[5] Brecl K., Topič M. Self-shading losses of fixed free-standing PV arrays // Renew. Energy. Elsevier, 2011. Vol. 36, № 11. P. 3211-3216.

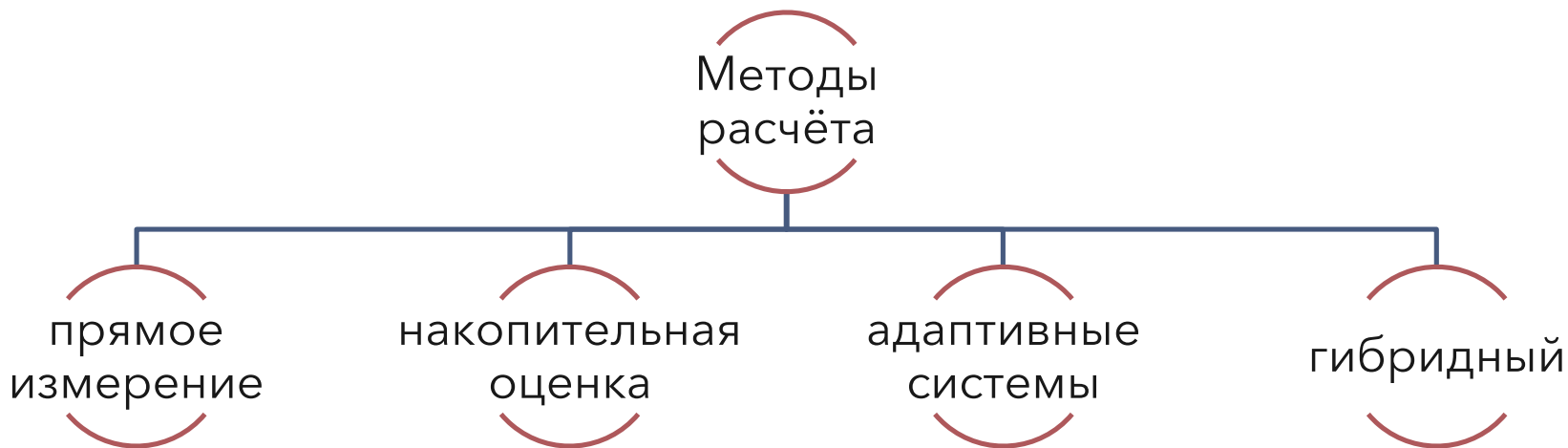
Моделирование СНЭ



Состояние заряда аккумулятора можно определить как:

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n},$$

где $Q(t)$ - текущая ёмкость АКБ, Q_n - номинальная ёмкость АКБ.



[6] Xiong R. et al. Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 1832-1843.

[7] Chiasson J., Vairamohan B. Estimating the state of charge of a battery // IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2005. Vol. 13, № 3. P. 465-470.

Моделирование СНЭ



Ограничение состояния заряда АКБ:

$C(t - 1) = SOC(t - 1) < C_{max} \rightarrow$ Заряд АКБ возможен;

$C(t - 1) = SOC(t - 1) = C_{max} \rightarrow$ Заряд невозможен;

$C(t - 1) = SOC(t - 1) > C_{min} \rightarrow$ Разряд возможен;

$C(t - 1) = SOC(t - 1) = C_{min} \rightarrow$ Разряд невозможен.

При этом C_{max} зависит от типа АКБ, зачастую $C_{max} \geq 20\%$

Ограничения батарейного инвертора:

$$P_{зар}(t) = C_{max} - C(t - 1);$$

$P_{зар}(t) \leq P_{инв} \rightarrow$ Вся доступная энергия идет на заряд АКБ;

$P_{зар}(t) > P_{инт} \rightarrow$ Заряд АКБ ограничивается инвертором.

Моделирование ДЭС



Удельный расход условного топлива с учётом изменения нагрузки на валу ДГУ:

$$b_{у.т\ i}^{ДГУ} = \frac{b_{НОМ}^Д}{\eta_{НОМ}^Г} \cdot \left(0,9 + \frac{0,1}{(N_{\phi\ i}/N_{НОМ\ i})} \right) \cdot \frac{Q_p^H}{7000},$$

где $b_{НОМ}^Д$ - показатель расхода топлива по дизель-генератору (гр./((кВт·ч)); $\eta_{НОМ}^Г$ - КПД ДГУ (о.е.); $N_{\phi\ i}$ - средняя прогнозируемая нагрузка i -го дизель-генератора за соответствующий период (кВт); $N_{НОМ\ i}$ - паспортная мощность i -й ДГУ (кВт); $Q_p^H = 10180$ ккал/кг - теплота сгорания топлива.

Абсолютный расход ДГУ:

$$Q_i^{ДГУ} = \frac{b_{у.т\ i}^{ДГУ} \cdot N_i}{1,45 \cdot \rho},$$

где $\rho = 860$ кг/м³ - плотность дизельного топлива; 1,45 - коэффициент перевода дизельного топлива в условное топливо (о.е.).

Моделирование ДЭС



Ограничения работы ДГУ:

- Минимальная нагрузка ДГУ:

$$N_{min}^{ДГУ} > 0,25 \cdot N_{НОМ}$$

- ДГУ разных серий могут работать параллельно только в случае:

$$\frac{N_{НОМ}^{min}}{N_{НОМ}^i} \leq \frac{1}{3}$$

Расчёт и прогнозирование режимов работы СДК



Основой расчета режима работы СДК является соблюдение баланса мощности между всеми источниками энергии и электрической нагрузки в каждый момент времени:

$$P_{\text{нагр}}(t) = P_{\text{СФЭМ}}(t) \cdot \eta_{\text{ИНВ}} \pm P_{\text{АКБ}}(t) + P_{\text{ДЭС}}(t),$$

где $P_{\text{нагр}}(t)$ - нагрузка потребителя; $P_{\text{СФЭМ}}(t)$ - полезная мощность солнечных фотоэлектрических модулей; $\eta_{\text{ИНВ}}$ - КПД инвертора; $P_{\text{АКБ}}(t)$ - мощность заряда/разряда системы накопления энергии; $P_{\text{ДЭС}}(t)$ - мощность дизельных генераторных установок.

Можно выделить следующие основные этапы расчета режима работы энергетического комплекса:

1. Определение электрической нагрузки потребителя на весь период планирования с принятым разбиением на расчетные интервалы.
2. Определение электроэнергии, вырабатываемой солнечными фотоэлектрическими модулями, и сравнение ее величины с нагрузкой за каждый расчетный интервал времени.

При этом возможны следующие сценарии:

а) Выработка СФЭМ перекрывает энергопотребление потребителя.

Заряд АКБ не ограничивается инвертором:

$$C(t) = C(t - 1) \cdot k + P_{\text{СФЭМ}}(t) \cdot \eta_{\text{инв}} - P_{\text{нагр}}(t);$$

$$P_{\text{с.э}} = 0.$$

Заряд АКБ ограничивается инвертором:

$$C(t) = C(t - 1) \cdot k + P_{\text{зар}}(t);$$

$$P_{\text{с.э}}(t) = P_{\text{СФЭМ}}(t) \cdot \eta_{\text{инв}} - P_{\text{нагр}}(t) - P_{\text{зар}}(t).$$

$$P_{\text{ДГУ } 1}(t) = P_{\text{ДГУ } 2}(t) = \dots = P_{\text{ДГУ } n}(t) = P_{\text{ДЭС}}(t) \rightarrow 0,$$

где k - коэффициент саморазряда АКБ; $P_{\text{с.э}}$ - величина свободной энергии;
 $P_{\text{ДГУ } i}(t)$ - мощность i -й ДГУ.

б) Когда выработка СФЭМ меньше энергопотребления или равна нулю.

Заряда АКБ достаточно для энергоснабжения нагрузки:

$$C(t) = C(t - 1) \cdot k - P_{\text{нагр}}(t) + P_{\text{СФЭМ}}(t) \cdot \eta_{\text{ИНВ}};$$

$$P_{\text{ДГУ}_1}(t) = P_{\text{ДГУ}_2}(t) = \dots = P_{\text{ДГУ}_n}(t) = P_{\text{ДЭС}}(t) \rightarrow 0;$$

Заряда АКБ недостаточно для энергоснабжения нагрузки:

$$C(t) = C(t - 1) \cdot k \pm P_{\text{зар/разр}}(t):$$

Выработка СФЭМ равна нулю:

$$P_{\text{ДЭС}}(t) = P_{\text{нагр}}(t);$$

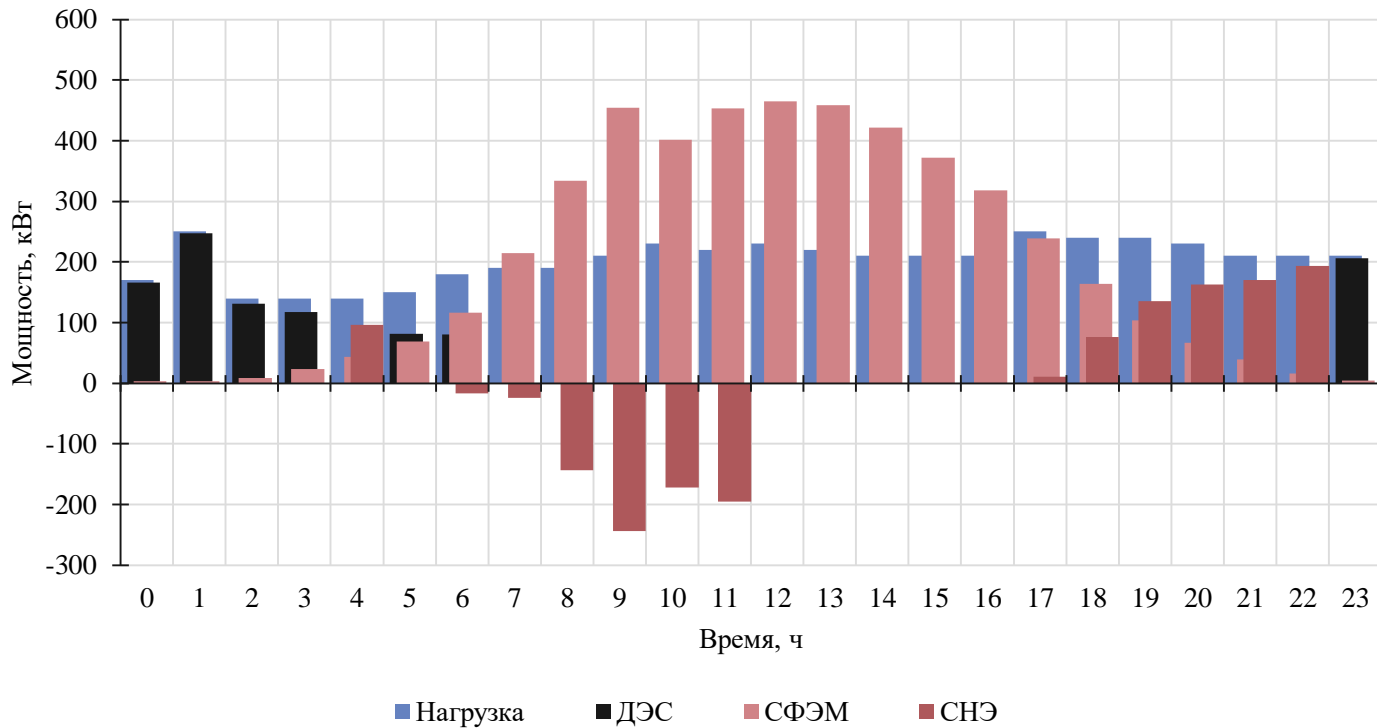
$$C(t) = C(t - 1) \cdot k.$$

$$P_{\text{С.э}} = 0.$$

Апробация на примере СДК в г. Верхоянск, Республика Саха (Якутия).

- СЭС мощностью 952 кВт;
- СНЭ ёмкостью 1400 кВт*ч на основе свинцово-углеродных АКБ и 2-х двунаправленных инвертора по 150 кВт;
- ДЭС и 3-х пар ДГУ мощностью 400, 520 и 315 кВт.

Расчёт и прогнозирование режимов работы СДК. Характерный день в июле



Расчёт и прогнозирование режимов работы СДК. Результаты моделирования

Параметры сравнения		Условия работы СДК		
		Работа СДК без СНЭ	Работа СДК с ограничением по емкости СНЭ	Работа СДК с ограничением по емкости СНЭ и зарядной мощности батарейного инвертора
C_{max}	кВт·ч	0	1000	1000
C_{min}	кВт·ч	0	200	200
$N_{зар}^{инв}$	кВт·ч	-	-	200
$N_{разр}^{инв}$	кВт·ч	-	-	250
WES	МВт	225,95	113,99	115,66
$b_{у.т}^{дэс}$	гр./кВт·ч	258,34	254,04	254,06
$Q_{дэс}$	т	868,76	837,39	837,80
КИУМ СЭС	%	8,72	10,00	9,98

Входные данные для алгоритма моделирования и прогнозирования режима работы СДК:

- Марки ДГУ с паспортными значениями потребления дизельного топлива и КПД генератора;
- КПД солнечного инвертора;
- Номинальная и минимальная ёмкость СНЭ;
- Данные о географической точке для получения данных о приходе СИ и температуры.

Выходные данные:

- Удельный и абсолютный расход дизельного топлива за расчётный период;
- Излишек энергии от СЭС;
- Оптимальный состав генерирующего оборудования.