

УДК 629.5.064.5

Захарченко В.Н., Шевченко В.А.
НУ ОМА

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ

Постановка проблемы. В последние десятилетия рост энерговооруженности судов торгового и специализированного флота, а также их оборудование большим числом генераторных агрегатов и неоднородных по своим характеристикам потребителей актуализировало проблему управления электроэнергетическими установками сложных структур [1]. При этом одним из наиболее важных является вопрос управления электрической станцией в условиях изменения нагрузки в нормальных и аварийных режимах [2, 3], где ключевыми являются задачи согласования уровней генерируемой мощности и мощности, требуемой в данный момент; перехода от одного уровня генерируемой мощности к другому с учетом критериев эффективности; управление составом генераторных агрегатов (ГА) с учетом состояний электростанции и управляющих воздействий от оператора; организация включения/отключения ГА с учетом аварийных состояний ГА и управляющих воздействий от оператора.

Цель исследования. Целью исследования является определение подхода к решению задачи управления составом генераторных агрегатов электроэнергетических установок сложных структур при изменении нагрузки, а также способа ее формализации.

Результаты исследований. В качестве исходной структуры системы управления судовой электростанцией выберем структуру, принятую в [4], и в соответствии с перечисленными выше задачами введем следующие обозначения программных модулей и команд управления: SBCNT – программа счета количества ГА; PRNRY – программа определения необходимого количества ГА; PRSEL – программа выбора резерва; PRST – программа пуска; PRSP – программа останова; PRSY – программа синхронизации; PRSH – программа распределения нагрузки; PRUNL – программы разгрузки останавливаемого ГА; ST(i) – команда на пуск i -го ГА; SP(i) – команда на останов i -го ГА; PH(l) – верхний порог загрузки для l параллельно работающих ГА; PD(l) – нижний порог загрузки для l параллельно работающих ГА.

Исходя из принятой двухуровневой структуры системы управления [4], отнесем программные модули SBCNT, NRY, PRSY и PRSH к верхнему уровню локального координатора (LC), а модули PRSEL, PRST, PRSP и PRUNL – к нижнему уровню локальной подсистемы (LP).

В данном случае программа координатор после каждого технологического цикла $T_{ТЦ}$ должна: определить количество ГА, подключенных к ГРЩ, т.е. выполнить подпрограмму счета SBCNT, порождающую предикат $WRK(l)=И$, если работают l ГА; рассчитать необходимое в соответствии с нагрузкой количество ГА $NRY(l \pm 1)$, т.е. выполнить программу PRNRY, порождающую предикат $NRY(l \pm 1)=И$, если в СЭС необходимы $l \pm 1$ параллельно работающих ГА и выбрать резервный ГА при помощи программы PRSEL для запуска PRST или остановки PRSP.

В общем случае обобщенная конструкция преобразователя состава ГА, отвечающего сформулированным требованиям, имеет вид, представленный на рис. 1, где $GA(N_{GA}) = \bigcup^m GA(i)$ – множество ГА, установленных в СЭС.

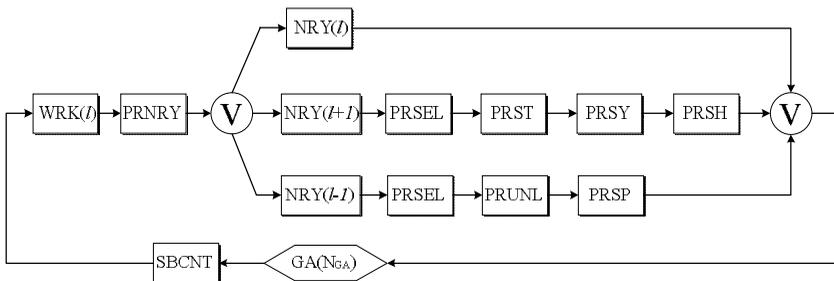


Рис. 1. Обобщенная конструкция преобразователя

Рассмотрим способы формализации заданий для модулей SBCNT и PRNRY.

На первом этапе исследования рассмотрим вопросы, связанные с логическим программированием модуля SBCNT, порождающего предикат:

$$WRK(l) \in WRK(N_l), l \in N_l, N_l = \overline{0, m}, |N_l| = m + 1$$

В качестве входной информации примем сигналы $SWG(i) \in SWG(N_{GA})$, поступающие в контроллер от сигнализаторов состояний (вкл/откл) генераторных автоматических выключателей $SWG(N_{GA})$,

$|N_{GA}|=m$, и образующие на входе устройства ввода, в каждый технологический цикл $T_{ТЦ}$, m – разрядное двоичное слово $S_{SWG}(i) \in S_{SWG}(N_S)$ с количеством возможных различных комбинаций значений переменных, определяемых выражением $2^m=|N_S|$.

Поскольку $|N_l| \neq |N_S|$, то между $WRK(N_l)$ и $S_{SWG}(N_S)$ можно установить функциональное соответствие в виде булевых функций:

$$WRK(l) = \bigvee_{j=1}^{C_m^l} k_j^l$$

где k_j^l - конъюнкция, конституента единицы, в которой l неинверсных и $m-l$ инверсных переменных $S_{SWG}(i)$; \bigvee – дизъюнкция, объединяющая все возможные конъюнкции полной длины.

Такое соответствие можно задать также табличным способом, например, табл. 1 для четырехагрегатной ($m=4$) электростанции.

Таблица 1. Комбинации ГА четырехагрегатной электростанции

	$S_{SWG}(N_S)$															
	0	1	2	4	8	3	5	6	9	10	12	7	11	13	14	15
SWG(1)	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1
SWG(2)	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1
SWG(3)	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
SWG(4)	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
WRK(l)	WRK(0)	WRK(1)				WRK(2)						WRK(3)				WRK(4)

В данном случае можно предложить несколько способов формирования алгоритмов функционирования модуля SBCNT. Например, если выполнить арифметическое сложение значений входных переменных и результат взять в качестве истинного предиката, то получим следующее правило:

$$while\ SBCNT\ do: \sum_{i=1}^m S_{SWG}(i),\ if\ \sum_{i=1}^m S_{SWG}(i) = l\ then\ WRK(l)\ fi\ od$$

Можно также использовать входное слово $\bigcup S_{SWG}(i)$ в качестве адреса истинного предиката. Тогда некрайним предикатам будут соответствовать вполне определенные группы адресных слов. Например, предикат $WRK(1)$ будет порождаться по правилу:

$$if\ \vee (S_{SWG}(1), S_{SWG}(2), S_{SWG}(4), S_{SWG}(8))\ then\ WRK(1)\ fi$$

Следующий этап исследования связан с вопросами описания модуля PRNRY, порождающего предикаты $NR_Y(l)$, $NR_Y(l+1)$, $NR_Y(l-1)$ в зависимости от загрузки одиночно или параллельно работающих ГА. Здесь прежде всего возникает необходимость в порождении первичных предикатов $PH(N_l)$ и $PD(N_l)$, идентифицирующих достижение нагрузкой верхних и нижних порогов загрузки.

Верхние пороги загрузки будем определять из расчета допустимой по техническим условиям нагрузки P_d на один ГА и необходимого запаса генерируемой мощности $v_1 P_d$, $0 < v_1 < 1$, а нижние пороги из расчета целесообразного по экономическим соображениям запаса $v_2 P_d$, $0 < v_2 < 1$. В таком случае порождение предикатов $PH(l)$, $PD(l)$ можно записать в виде следующего правила:

$$\begin{aligned} \text{while PRNRY do: } & \sum_{i=1}^l P_{\Gamma}(i) \text{ if } \sum_{i=1}^l P_{\Gamma}(i) \geq (\sum_{i=1}^l P_d(i) - v_1 P_d) \\ & \text{then } PH(l) \text{ else if } \sum_{i=1}^l P_{\Gamma}(i) \leq (\sum_{i=1}^l P_d(i) - v_2 P_d) \text{ then } PD(l) \text{ else fi od,} \end{aligned} \quad (1)$$

где $P_{\Gamma}(i)$ – текущая нагрузка i -го ГА. $P_{\Gamma}(i)$ в зависимости от технических условий будет изменяться в пределах [4]:

$$\left(1 - \frac{1 + v_2}{l}\right) P_d \leq P_{\Gamma}(i) \leq \left(1 - \frac{v_1}{l}\right) P_d, \quad P_d = P_H K_{RCL}, \quad (2)$$

где K_{RCL} – коэффициент пересчета мощности при изменении условий окружающей среды; $\left(1 - \frac{1 + v_2}{l}\right)$ – коэффициент загрузки.

Из выражения (2) видно, что с увеличением числа l параллельно работающих ГА коэффициент загрузки возрастает, стремясь в пределе к единице. На рис. 2 показана диаграмма управления составом ГА по принципу «жестких порогов» загрузки, соответствующая управлению четырехагрегатной СЭС при $v_1=0,2$ и $v_2=0,4$.

Из выражений (1, 2) также следует, что изменять пороги загрузки СЭС можно, варьируя параметрами v_1 , v_2 , P_d – отдельно или в различных сочетаниях, т.е. можно реализовывать множество способов управления электростанцией по принципу «гибких порогов» загрузки.

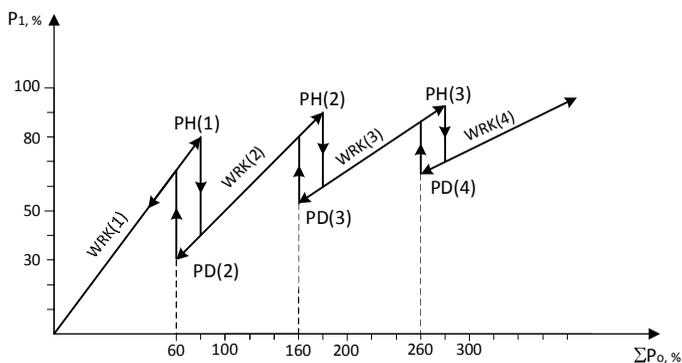


Рис. 2. Диаграмма управления составом ГА по принципу «жестких порогов» загрузки

Тем не менее, эти способы не будут исчерпывающими, так как они предусматривают управление лишь генерируемой мощностью. Если же учесть возможность управления нагрузкой электростанции (потребителями) путем отключения/включения части потребителей, запрета на включение запрашиваемых потребителей на определенный пик загрузки, а также предусмотреть накопители электроэнергии, то область способов управления составом ГА можно значительно расширить. В этом случае потребуются постановка задачи о временных задержках пуска резервного ГА.

С целью фильтрации непродолжительных выбросов нагрузки, связанных, например, с пуском или повторно-кратковременной работой потребителей, целесообразно использовать способ временного разделения выбросов, а для согласования перегрузочных характеристик ГА с временными задержками (способ амплитудно-временного разделения).

В этом случае выбросы не должны учитываться, если их длительность меньше заданного временного интервала $t_{PH}(min) \pm \Delta t_{PH}$, где Δt_{PH} – временной интервал, корректирующий возможную нестабильность длительности выброса.

Если же по истечении $t_{PH}(min)$ выброс $PH(I)=I$, то значение второго временного интервала задержки должно выбираться в зависимости от установившейся величины ΔP_H в соответствии с нагрузочными характеристиками ГА, например,

$$t_{PH} = \begin{cases} t_{PH}(min), & \text{if } \Delta P_{PH} \geq \Delta P_{PH}(max) \\ k_1(\exp(-\Delta P_{PH})), & \text{if } \Delta P_{PH}(min) < \Delta P_{PH} < \Delta P_{PH}(max) \\ t_{PH}(max), & \text{if } 0 \leq \Delta P_{PH} < \Delta P_{PH}(min) \end{cases}$$

или как показано на рис. 3.

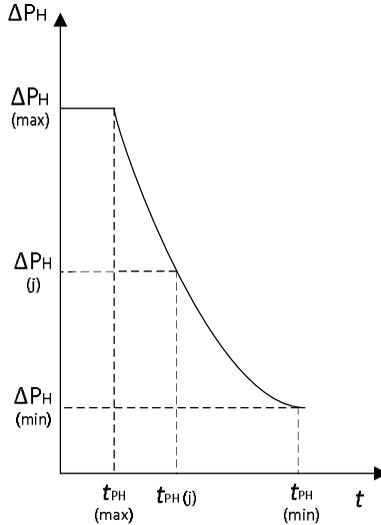


Рис. 3. Диаграмма коррекции временной задержки

Для отсчета задержек $t_{PH}(min)$ и $t_{PH}(j)$ должны быть предусмотрены подпрограммы таймера PR1TM и PRTM, порождающие соответствующие им предикаты T1PH и TPH по правилу:

```

if PH(l) then PR1TM else fi
while PR1TM do procedure: BPHmin, BPHmin - rCNT od;
if BPHmin - rCNT = 0 then T1PH else PR1TM fi;
if PH(l) & T1PH then PRTM else fi;
while PRTM do procedure: BPH, BPH - rCNT od;
if BPH - rCNT = 0 then TPH fi,

```

где $B_{PH}^{min} = t_{PH}^{(min)} / \Delta t_{PH}$ и $B_{PH} = t_{PH} / \Delta t_{PH}$ – числа, отображающие величины временных интервалов при заданном единичном интервале Δt_{PH} ; r_{CNT} – число, соответствующее порядковому номеру текущего

единичного интервала, т.е. текущему значению времени t на отрезке t_{PH} , $t = r_{CNT} \Delta t_{PH}$.

Однако, данный подход к определению временной задержки справедлив для установившегося выброса, когда в течение t_{PH} вероятность дальнейшего увеличения нагрузки мала. В то же время, как показывает практика, на отдельных уровнях загрузки электростанции имеют место существенные колебания стандартного отклонения σ_x относительно средних значений. Неучет этих колебаний может за время задержки привести к перегрузке двигателя, что является существенным недостатком.

Устранить этот недостаток можно путем сравнения значений действительной выработанной к текущему моменту времени r_{CNT} энергии W_T с допустимой W_D на участке $t_{PH} = B_{PH} \Delta t_{PH}$, полученной по результатам замера мощности в нулевом такте $\Delta P_{PH}(0)$, рис. 4, т.е. можно считать, что время задержки истечет в тот момент, когда:

$$W_T - W_D \geq 0;$$

$$W_T = \sum_{j=1}^{r_{CNT}} \Delta P_{PH}(j), \quad W_D = \Delta P_{PH}(0) B_{PH}.$$

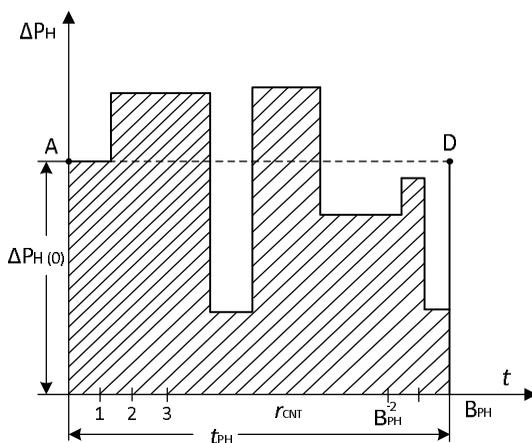


Рис. 4. Нагрузка электростанции:

а) допустимое значение (линия A-D);

б) действительное значение (заштрихованная область)

В таком случае процедура контроля задержки сводится к следующему правилу:

if PH(*l*) *then* PRTM *else* *fi*;
while PRTM *do* *procedure* CTM: $\Delta P_{PH}(0)$, t_{PH} , Δt_{PH} , B_{PH}
while CTM *do*: $\sum_{j=1}^{r_{CNT}} \Delta P_{PH}(j) - \Delta P_{PH} B_{PH}$ *if*
 $\sum_{j=1}^{r_{CNT}} \Delta P_{PH}(j) - \Delta P_{PH} B_{PH} > 0$ *then* TPH *else* PRTM *fi*

Процедура CTM на основании $\Delta P_{PH}(0)$ определяет t_{PH} , рассчитывает B_{PH} и ведет счет программы таймера.

По истечении t_{PH} , если $\Delta P_{PH} > 0$, можно с целью сохранения текущего состава ГА по критерию выгоды предусмотреть также некоторые меры по их разгрузке, например, путем отключения второстепенных потребителей (CNS) или включения накопителя электроэнергии.

Выводы. В работе сформулированы основные задачи управления электроэнергетической установкой сложной структуры в условиях изменения нагрузки в нормальных и аварийных режимах.

Предложена обобщенная структура преобразователя состава ГА, состоящего из группы программных модулей, участвующих в решении задач управления составом ГА при изменении нагрузок.

Приведены примеры формализации программных модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В. А. Верификация функциональных алгоритмов системы управления многоагрегатной судовой электрической станцией / В. А. Шевченко // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса: ОНМА. – С. 70 – 76.
2. Пипченко А. Н. Проблемы оптимизации судовых электростанций / А.Н. Пипченко, А.А. Толстов // Научн. журнал. – Вып. 6. – Л.: Судостроение, 1985. – С. 77-84.
3. Головки С. В. Моделирование автоматической системы управления судовой электростанции с учетом состояния оборудования / С. В. Головки // Вестник Астраханского государственного технического университета: научн. журнал. – Вып. 3 – Астрахань, 2014. – С. 58 – 63.
4. Пипченко А. Н. О некоторых методологических аспектах построения рациональных структур микропроцессорных систем в су-

довой энергетике / А.Н. Пипченко, В. В. Пономаренко // Электрооборудование и автоматизация установок и систем: сб. науч. тр. – Николаев, НКИ, 1988. – С. 47-58.