

УДК 621.175

В.В. Шевченко<sup>1</sup>, И.Я. Лизан<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный технический университет «ХПИ», Харьков<sup>2</sup>Учебно-научный профессионально-педагогический институт УИПА, Артемовск

## КОНЦЕПЦИЯ ВЫБОРА ДВИГАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ БЛОКА АЭС ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ

Основными энергогенерирующими предприятиями в Украине являются АЭС. Поэтому их надежная работа, работа установленного на станции электрооборудования – важная техническая, экономическая и экологическая задача. Надежность при этом должна сочетаться с полным функциональным соответствием установленного оборудования технологическим процессам АЭС. В работе рассмотрены факторы, влияющие на тепловое состояние, и вопросы ускорения пуска двигателей систем охлаждения оборудования блока АЭС.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, системы охлаждения, надежность, время пуска двигателей.

### Введение

**Постановка проблемы.** С момента введения в эксплуатацию в 1954 г. первой АЭС (г. Обнинск), они стали вполне конкурентоспособными и превосходят по энерговыработке и безопасности тепловые электростанции (ТЭС) на органическом топливе, а единичные мощности агрегатов АЭС давно превысили уровень мощностей установленных на ТЭС генераторов. В настоящее время на территории Украины расположены четыре АЭС, которые вырабатывают примерно 52 % всей производимой электроэнергии [1]. Весомым преимуществом атомной энергетики является то, что она при нормальной эксплуатации нет выбросов в атмосферу оксидов серы, азота и других газов, приводящих к кислотным дождям, парниковому эффекту, т.е. АЭС является одним из оптимальных источников получения электроэнергии с нанесением наименьшего ущерба экологии Земли. Кроме этого, к преимуществам АЭС необходимо отнести и низкую себестоимость вырабатываемой электроэнергии, а также возможность размещения АЭС в местах плотного проживания потребителей. Но технические системы большой сложности и мощности, к которым относятся объекты ядерной энергетики, всегда имеют определенную степень риска аварий, опасных для человека и окружающей среды. При этом даже единичная авария может иметь катастрофические последствия. Исторические события, сопутствующие развитию ядерной энергетики: аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США, 1979 г), на Чернобыльской АЭС (СССР, 1986 г), авария на АЭС Фукусима-1 (крупная радиационная авария 7-го уровня по шкале *INES*, которая произошла 11.03.2011 г. в результате сильнейшего землетрясения в Японии и последовавшего за ним цунами) и т.д., – выдвигают требования непрерывного проведения мероприятий по повышению надежности работы электрооборудования блоков станций.

**Целью работы** является рассмотрение вопроса совершенствования одного из процессов работы блока – ускорение пуска электродвигателей (ЭД) насосов систем охлаждения блоков АЭС и сокращение времени выхода их на номинальный режим работы.

### Основной материал

Тяжелые последствия Чернобыльской аварии, даже спустя 25 лет, вызывают серьезную обеспокоенность широких кругов населения, как в нашей стране, так и за рубежом, доходящую до полного неприятия ядерной энергетики. В Украине и в других странах (Германия, Китай, США и т.д., [1 – 3]) было практически прекращено строительство, и даже проектирование, новых АЭС, законсервированы недостроенные энергоблоки, выведена из эксплуатации часть действующих энергоблоков. Свертывание намеченной ранее программы развития ядерной энергетики создало значительные трудности в обеспечении ряда районов электрической и тепловой энергией. Для Украины, в связи с нарастающим энергетическим кризисом из-за отсутствия крупных запасов нефти и природного газа, а также истощения угольных запасов, развитие энергетики оказывается невозможным без развития ядерной энергетики. Понимая это, в 1995 г. Верховной Радой Украины был отменен мораторий на строительство и прием в эксплуатацию новых энергоблоков. Необходимо отметить, что все увеличивающиеся масштабы развития ядерной энергетики, в сочетании с необходимостью обеспечения безусловной надежности и безопасности АЭС, определяют высокие требования к качеству проектирования станций и их оборудования, строительству АЭС, изготовлению и монтажу основного и вспомогательного оборудования, а также особенно к эксплуатации энергооборудования, ЭД на АЭС и их защиты. Однако ситуация, которая сложилась на АЭС «Фукусима-1», показала, что существующие каналы резервирования не всегда обеспечивают безопасность. Авария была спровоцирована землетрясением. В момент землетрясения три работаю-

ших энергоблока были остановлены действием системы аварийной защиты, которая сработала в штатном режиме. Но спустя час электроснабжение было прервано (в том числе и от резервных дизельных электростанций), как считают, из-за последовавшего за землетрясением цунами. Электроснабжение необходимо для отвода остаточного тепловыделения реакторов, которое, согласно формуле Вэя-Вигнера, в первые секунды составляет около 6,5 % от уровня мощности до останова, через час – примерно 1,4 %, через год – 0,023 %, [4]. Исходя из этой зависимости, мощность остаточного тепловыделения уменьшается по закону, Вт:

$$\frac{W_{\beta\gamma}}{W_0} = 6,5 \cdot 10^{-2} \cdot [\tau_c^{-0,2} - (\tau_c + T)^{-0,2}],$$

где  $W_{\beta\gamma}$  – мощность остаточного тепловыделения реактора через время  $\tau_c$  после его останова, Вт;

$W_0$  – мощность реактора, на которой он работал в течение времени  $T$ , (с) до останова, Вт;

На начальном этапе после останова, когда  $\tau_c \ll T$ , можно использовать упрощенную зависимость:

$$W_{\beta\gamma} = 6,5 \cdot 10^{-2} \cdot W_0 \cdot \tau_c^{-0,2}, \text{ Вт.}$$

Существует необходимость при любых условиях обеспечить теплоотвод от реактора. На случай внезапной остановки реактора конструкция включает различные системы аварийного охлаждения (расхолаживания) активной зоны с электроснабжением от резервных электростанций.

Основу электроприводов на АЭС в системах охлаждения составляют асинхронные электродвигатели (АД), которые работают в различных режимах. Двигатели средней и большой мощности при пусках потребляют большие токи (5 – 7 кратные по сравнению с номинальными), что во многих электроприводах приводит к «посадке» напряжения на их зажимах и к снижению их пусковых моментов, увеличению времени пуска и существенным нагревам обмоток АД, что обуславливает снижение рабочего ресурса изоляции. Существующие методы расчета АД предусматривают, что напряжение на их зажимах во всех режимах постоянно и равно номинальному значению. Поэтому весьма актуальной для определения надежности работы электродвигателей является задача разработки методов определения их теплового состояния при работе в электроприводах с учетом снижения напряжения при пуске, что является залогом поддержания надежности системы охлаждения.

Время пуска АД определяется по формуле, с:

$$t_{\Pi} = j \frac{w_1}{M_H} \int_{S_H}^1 \frac{1}{M_i / M_H - M_C / M_H} ds,$$

где  $j$  – момент инерции вращающихся масс, кг·м<sup>2</sup>;

$\omega_1$  – угловая частота, рад/с;

$M_H$  – номинальное значение момента ЭД, Н·м;

$M_i$  – текущее значение момента ЭД, Н·м;

$M_C$  – момент сопротивления двигателя, м<sup>3</sup>.

Общее количество тепла, выделяющееся в обмотке ротора за пуск, может быть рассчитано, Дж:

$$A_{P,\Pi} = A_{P,\Pi,ЭМ} + jw_1^2 \int_{S_H}^1 \frac{M_i / M_H}{M_i / M_H - M_C / M_H} ds \cong \\ \cong 1,25 jw_1^2 \int_{S_H}^1 \frac{M_i / M_H}{M_i / M_H - M_C / M_H} ds.$$

Номинальными параметрами ЭД являются мощность, напряжение, ток, скорость вращения и коэффициент мощности ( $\cos\phi$ ). Номинальные данные ЭД указывают на щитке (заводской табличке), который крепится к его корпусу. Контролируемые параметры: напряжение, ток, температура, вибрация, направление вращения.

ЭД допускают длительную работу с номинальной нагрузкой при отклонении напряжения в пределах +10 % и -5 % номинального значения. Момент АД изменяется пропорционально квадрату приложенного напряжения. При напряжении в сети на 5 % ниже номинального допускается работа ЭД без каких-либо ограничений, однако производительность механизмов понижается из-за увеличения скольжения. Поэтому работа ЭД при напряжении на шинах ниже номинального не рекомендуется.

Повышение номинального напряжения на 5 % обеспечивает рост производительности механизмов собственных нужд электростанций. В случае необходимости, вызванной питанием от шин генераторного напряжения удаленных электроприемников, допускается отклонение напряжения в системе собственных нужд до 4 – 10 % от номинального.

При отклонениях частоты от номинального значения скорость вращения ЭД изменяется пропорционально изменению частоты, так же как и мощность на валу ЭД, если момент сопротивления механизма не зависит от скорости. С изменением частоты более резко изменяется скорость вращения механизмов вентиляторного типа (привод насосов), у которых момент сопротивления изменяется пропорционально квадрату, а мощность на валу – пропорционально кубу изменения частоты вращения.

Длительно допустимые нагрузки ЭД соотносятся с номинальными условиями охлаждения, т.е. с температурой охлаждающей среды ( $t_{окр} = +40^\circ\text{C}$ ). В табл. 1 приведены наибольшие допустимые превышения температуры отдельных частей ЭД над температурой охлаждающего воздуха. Кратковременно допустимые превышения температуры отдельных частей могут быть больше на  $10^\circ\text{C}$ .

Контроль температурного режима ЭД заключается в наблюдении за разницей температур входящего и выходящего охлаждающего воздуха или другой газообразной среды. Во избежание отпотевания температура входящего воздуха должна быть не ниже

$+(5\div 10)^{\circ}\text{C}$ . Разность между температурой охлаждающего воздуха и температурой воды, входящей в воздухоохладитель, обычно не превышает  $(7 - 10)^{\circ}\text{C}$ . Резкое увеличение этого перепада свидетельствует о загрязнении воздухоохладителя.

Таблица 1

Наибольшие допустимые превышения температуры отдельных частей ЭД над температурой окружающей среды

Части двигателя	Класс изоляции В	Метод измерения
Обмотки статоров и фазных роторов, °С	80	Измерение сопротивления
Стержневые обмотки роторов, °С	90	
Сталь статора, контактные кольца, °С	80	Термометром

Мощность, потребляемая собственными нуждами АЭС, достигает 4 – 5 % от мощности, вырабатываемой АЭС. Обесточение собственных нужд обычно приводит к остановке работы электростанции, что является крупной аварией. Поэтому основные потребители собственных нужд – самые ответственные потребители и по значимости более важные, чем даже потребители первой категории.

Недостатком схем электроснабжения на АЭС, имеющих связь с общей сетью, является понижение напряжения на электроприемниках собственных нужд при понижении напряжения сети [5]. Понижение напряжения может вызвать «опрокидывание» ЭД и повлечь за собой серьезные расстройства работы электростанции. «Опрокидывание» ЭД и, в конечном счете, их остановка, когда момент сопротивления агрегата превышает момент, развиваемый на валу ЭД, возникает при снижении напряжения в сети двигателя. Обеспечение возможности самозапуска ЭД, при котором «опрокинувшийся» двигатель автоматически входит в работу после того, как напряжение восстановится, практически полностью устраняют этот недостаток. Существуют три основные причины понижений напряжений, могущие отразиться на работе ЭД собственных нужд:

- 1) удаленные короткие замыкания (КЗ);
- 2) близкие КЗ, при которых напряжение падает практически до нуля и затем быстро восстанавливается;
- 3) перерыв электроснабжения при отключении источников питания.

Удаленные КЗ практически не отражаются на работе ЭД собственных нужд. Кратность максимального момента большинства ЭД лежит в пределах 2,0 – 2,5, а для таких двигателей при их номинальной нагрузке напряжение опрокидывания лежит ниже 0,65 номинального. Продолжительность понижения напряжения определяется уставками защиты сети от КЗ и не превышает нескольких се-

кунд. Перегрев обмоток за это время из-за повышения токов статора и ротора невелик, ЭД остается в работе, если защиты от перегрузок и минимального напряжения настроены правильно. При близких КЗ напряжение понижается практически до нуля. В первый момент ЭД будет посылать к месту КЗ ток, который (при условии, что сопротивление сети между двигателем и точкой КЗ очень мало) может быть определен по выражению:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{0,9 \cdot U}{X_{\text{д}}}, \text{ А} \quad (1)$$

где  $U$  – фазное напряжение сети, В;

$X_{\text{д}}$  – сопротивление фазы обмотки статора при заторможенном ЭД, Ом.

Из выражения (1) можно видеть, что ток от АД к месту КЗ, примерно равен пусковому току при замкнутой обмотке ротора. По мере снижения магнитного потока в ЭД этот ток будет затухать. Одновременно будет снижаться скорость вращения механизма подобно тому, как это происходит при выбеге после отключения двигателя. Однако характер процесса при групповом отключении или при снижении напряжения у группы ЭД будет несколько иным, чем при индивидуальном отключении. ЭД, у которых скорость вращения, магнитный поток и, следовательно, напряжение затухают медленнее, чем у других. Они будут стремиться поддержать снижающееся напряжение, работая как бы генераторами. Скорость выбега таких ЭД увеличится по сравнению с индивидуальным выбегом. У остальных ЭД выбег замедлится, все механизмы будут выбегать в начальный период синхронно, с некоторой усредненной скоростью.

После отключения КЗ напряжение на шинах собственных нужд восстанавливается, вместе с тем увеличивается напряжение на выводах и, соответственно, токи в обмотках неотключенных ЭД. Протекание этих токов в сети вызывает падение напряжения, которое может быть очень значительным. Если длительность короткого замыкания была невелика - порядка 0,5 с, - то ЭД не успеют значительно затормозиться, пусковые токи будут относительно небольшими, все двигатели начнут быстро ускоряться и нормальная работа их восстановится. При длительном периоде КЗ пусковые токи будут большими, что вызовет дополнительную потерю напряжения в сети, которая может быть очень значительной. В результате напряжение в сети может оказаться недостаточным для того, чтобы развернуть ЭД до номинальной скорости. В практике наблюдались случаи, когда, несмотря на наличие форсировки, напряжение не достигало номинального значения и двигатели длительное время работали примерно при 50 – 60 % номинальной скорости.

Нагрев ЭД при пуске зависит от количества тепла, выделившегося за время пуска, при котором ток

$$I = 0,93 \cdot I_{\text{к}}$$

где  $I_k$  – пусковой ток ЭД при неподвижном роторе (без учета постоянной составляющей).

Для облегчения самозапуска ЭД, имеющих существенное значение для работы станции, приходится при продолжительных КЗ отключать часть ЭД. С этой целью их пусковые устройства снабжаются защитой минимального напряжения с выдержкой времени. Чем существеннее значение работы данного ЭД для станции, тем большую уставку времени имеет его защита. Обычно двигатели разделяются на три группы:

- 1) ЭД без защиты от минимального напряжения (с уставкой времени защиты порядка 10 с);
- 2) ЭД с уставкой времени 2 – 3 с;
- 3) ЭД с мгновенным отключением.

Защита от перегрузки настраивается так, чтобы она не отключала ЭД при пусковых токах. Для АД с короткозамкнутым ротором и синхронных двигателей (СД) применяют прямой пуск при полном напряжении сети, (для СД – асинхронный пуск). Источники питания рассчитывают на прямые пуски самых крупных ЭД АЭС – АД с короткозамкнутым ротором для привода главных циркуляционных насосов (ГЦН), мощность которых составляет 5÷8 МВт. При этом предусматривают, чтобы понижение напряжения во время пуска не выходило за пределы, при которых обеспечиваются не только нормальный пуск механизма, но и нормальная работа других ЭД. Эти насосы оснащаются маховиками, выбираемыми с таким расчетом, чтобы при обесточении на 10 с их производительность снижалась не более чем в 2,7 раза.

На рис. 1 представлена принципиальная схема АЭС с реактором ВВЭР-1000, на рис. 2 – принципиальная схема электроснабжения ГЦН блока АЭС.

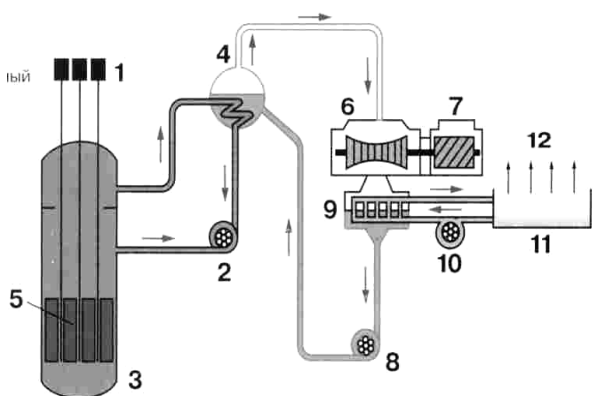


Рис. 1. Принципиальная схема АЭС с реактором ВВЭР

На рис. 1: 1 – Система управления и защиты; 2 – ГЦН; 3 – Корпус реактора; 4 – Парогенератор; 5 – Топливо; 6 – Турбина; 7 – Генератор; 8 – Питательный насос; 9 – Конденсатор; 10 – Циркуляционный насос; 11 – Пруд-охладитель; 12 – Потoki тепла, уходящего в атмосферу

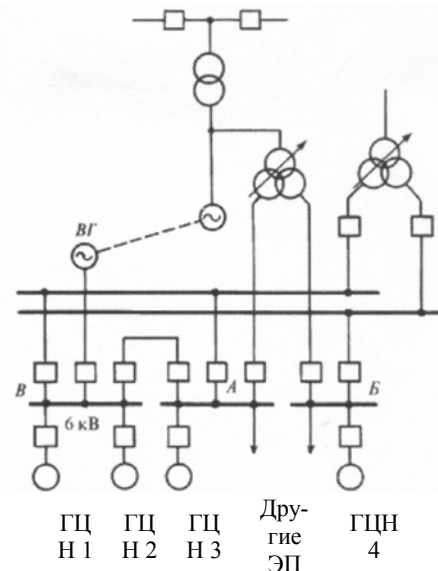


Рис. 2. Принципиальная схема электроснабжения ГЦН при использовании вспомогательного генератора.

У АД малый пусковой момент, поэтому "затянут" первый этап пуска. Для снижения времени воздействия пусковых токов на энергосистему целесообразно уменьшать время пуска, для чего целесообразно использовать частотный пуск, начиная с малых частот. Т.е. организовать пуск таким образом, чтобы в каждый момент времени пуска, подбором текущей частоты питания, момент находится в зоне критического (для этой частоты) скольжения, при этом пуск будет проходить все время при максимальном моменте.

С определенной степенью точности это скольжение можно рассчитать:

$$s_k = \frac{\psi_4 - \psi_2}{\psi_4} \approx \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + \psi_4^2 \cdot L_k^2}}$$

Примем, что активным сопротивлением обмотки статора в номинальном режиме можно пренебречь, т.е., что  $r_1 \rightarrow 0$ , тогда:

$$\frac{\psi_4 - \psi_2}{\psi_4} \Big|_k = \frac{r_2}{\psi_4 \cdot L_k} \quad \text{или} \quad \psi_4 = \psi_2 + \frac{r_2}{L_k},$$

где  $L_k$  – индуктивность короткого замыкания.

При низких значениях частоты вращения, т.е. при пуске и торможении, активное сопротивление обмотки  $r_1$  надо учитывать. Тогда частота питающего двигатель напряжения, Гц будет равна:

$$f_1 = \frac{n_2}{60} p + \frac{r_2}{L_k}$$

У механизмов с постоянным моментом сопротивления пусковой момент не зависит от скольжения и сохраняет постоянную величину. Чем больше величина избыточного момента, тем быстрее заканчивается пуск агрегата. Время разбега ЭД определяет температуру его обмотки в конце пуска. В связи с большой кратностью пусковых токов АД нагрев

обмотки при пуске происходит интенсивнее, чем при нормальном рабочем режиме. Поэтому частота пусков АД ограничивается.

В случае невозможности обеспечить самозапуск всех электродвигателей, в первую очередь нужно обеспечить самозапуск особо ответственных двигателей. При этом может потребоваться отключение части менее ответственных механизмов, чтобы повысить напряжение при самозапуске. Отключать электродвигатели следует с помощью защиты от минимального напряжения с выдержкой времени не менее 0,5 сек. Чем короче перерыв питания, тем легче самозапуск. Неответственные двигатели с тяжелыми условиями пуска отключаются защитой при потере питания или снижении напряжения на секции на 30 % номинального продолжительностью более 1 – 2 сек.

### Выводы

1. Надежность работы электродвигателей технологических процессов блока АЭС, как асинхронных, так и синхронных, в первую очередь определяется их температурными режимами, т.е. уровнем нагрева и выбранной системой охлаждения. Чем ниже температура нагрева изоляции, тем выше надежность работы электродвигателей.

2. Нагрев обмоток ротора и статора за время пуска двигателя под нагрузкой зависит также от напряжения, при котором производится пуск, причем пуск при пониженном напряжении через автотрансформаторы или пусковые реакторы, приводит к большему перегреву обмоток по сравнению с прямым пуском. Это объясняется тем, что при пуске двигателя при пониженном напряжении пусковой ток снижается, но одновременно возрастает и время разгона. Время разбега зависит от избыточного момента при разгоне ( $m_{дв} - m_c$ ) момент же вращения  $m_{дв}$  снижается пропорционально квадрату напряжения.

В итоге, время разбега с понижением напряжения увеличивается, так как при пуске через автотрансформатор или реактор напряжение на двигателе снижается, то время разгона возрастает в большей степени, чем снижается пусковой ток.

3. При прямом пуске, кроме снижения нагрева обмоток, уменьшается необходимое количество аппаратов, участвующих в схеме пуска, а из-за упрощения схемы пуска повышается надежность работы установок в целом.

Поэтому прямой пуск при полном напряжении сети рекомендуется для всех АД с короткозамкнутым ротором, в том числе и для самых мощных. Прямой пуск имеет аналогичные преимущества для синхронных двигателей и для электродвигателей с фазным ротором.

4. Для снижения времени воздействия пусковых токов на энергосистему необходимо уменьшать время пуска, для чего следует использовать частотный пуск, начиная с малых частот. Т.е. следует организовать пуск таким образом, чтобы в каждый момент времени пуска, подбором текущей частоты питания, момент находится в зоне критического (для этой частоты) скольжения, при этом пуск будет проходить все время при максимальном моменте.

### Список литературы

1. Шевченко В.В. Роль атомных электростанций в электроснабжении Украины и безопасность их эксплуатации / В.В. Шевченко, Р.В. Дубяга // М.: Электрика. – 2012. – № 7. – С. 34-39.
2. Шевченко В.В. Основные задачи, проблемы и направления развития отечественного турбогенеростроения / В.В. Шевченко // К.: Энергетика та електрифікація. – 2012. – № 10. – С. 33-39.
3. Шевченко В.В. Пути преодоления возможного энергокризиса в энергосистеме Украины // Збірник наукових праць Донецького Інституту залізничного транспорту. – Донецьк: ДІЗТ. – 2012. – № 29. – С. 77-81.
4. Шевченко В.В. Сценарии развития электроэнергетики Украины / В.В. Шевченко // К.: Системи управління, навігації та зв'язку. – 2012. – Вип. 3(23). – С. 151-155.
5. Шевченко В.В. Особенности пуска и самозапуска электродвигателей собственных нужд атомных электростанций / В.В. Шевченко // Х.: Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 46. – С. 226-234.

Поступила в редколлегию 27.02.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Юхимчук, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

### КОНЦЕПЦІЯ ВИБОРУ ДВИГУНІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ БЛОКУ АЕС ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ НАДІЙНОСТІ

В.В. Шевченко, І.Я. Лизан

*Розглядаються чинники, що впливають на тепловий стан, і питання прискорення пуску двигунів систем охолодження уставкування блоку АЕС.*

**Ключові слова:** атомна електростанція, системи охолодження, надійність, час пуску двигунів.

### THE CHOICE BLOCK CONCEPTION OF ENGINES TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR PROVIDING RELIABILITY NUCLEAR POWER PLANT

V.V. Shevchenko, I.Ya. Lyzan

*The factors, influencing on the thermal state and questions of acceleration starting of engines systems cooling equipment nuclear power plant block, are examined.*

**Keywords:** nuclear power plant, cooling systems, reliability, time of starting of engines.