

УДК 621.175

В.В. Шевченко¹, И.Я. Лизан²¹Национальный технический университет «ХПИ», Харьков²Учебно-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 τ_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·м²;

ω_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, м³.

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°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.

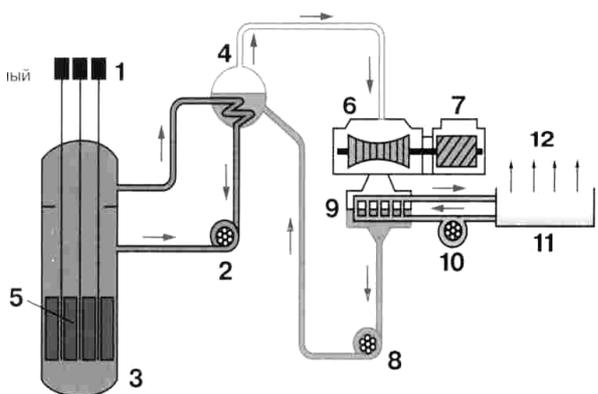


Рис. 1. Принципиальная схема АЭС с реактором ВВЭР

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 – Поток тепла, уходящего в атмосферу

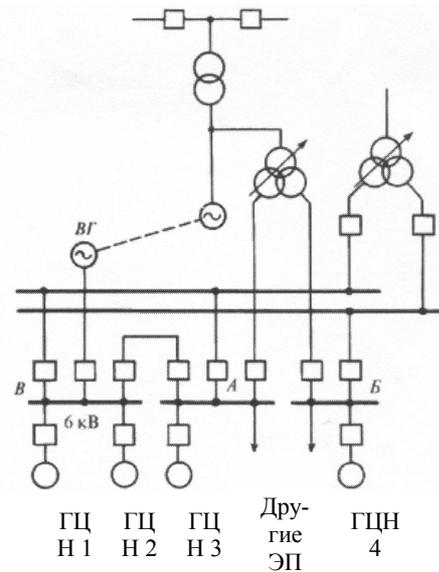


Рис. 2. Принципиальная схема электроснабжения ГЦН при использовании вспомогательного генератора.

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:

$$s_k = \frac{\psi_1 - \psi_2}{\psi_1} \approx \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + \psi_1^2 \cdot L_k^2}}$$

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

$$\frac{\psi_1 - \psi_2}{\psi_1} \Big|_k = \frac{r_2}{\psi_1 \cdot L_k} \quad \text{или} \quad \psi_1 = \psi_2 + \frac{r_2}{L_k},$$

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.