

О расчете длительных переходных процессов в энергосистемах¹

ЛОХАНИН Е.К., РОССОВСКИЙ Е.Л.

Показано, что при численном интегрировании полной системы дифференциальных уравнений синхронной машины увеличение расчетного интервала возможно только после устранения жесткости в уравнениях демпферных контуров. Для этой цели целесообразно использовать модель демпферных контуров, учитывающую по одному эквивалентному контуру в поперечной и продольной осях. Отмечено, что утверждения о целесообразности перехода к расчетной модели среднего движения при расчетах длительных переходных процессов являются ошибочными. Разработана методика расчета длительных переходных процессов, удовлетворяющая требованиям промышленного применения. Приведены примеры расчетов длительных переходных режимов по предложенной методике, воспроизводящих аварии в энергосистемах ОЭС Урала и Татарстана и обеспечивающих их исследование.

Ключевые слова: энергосистемы, переходные процессы, регулирование частоты и мощности, расчет

При исследовании длительного переходного процесса (ДПП) можно выделить две его стадии: начальную – электромеханический переходный процесс (ЭМПП), который через 4–5 с либо практически затухает, либо приводит к возникновению асинхронного режима, и возникающую после затухания ЭМПП стадию относительно медленного и длительного переходного режима с изменяющейся частотой, которая также может привести к нарушению устойчивой работы ЭЭС (стадия сползания режима) [1]. Поэтому анализ таких режимов работы энергосистемы имеет важное практическое значение.

Для расчета указанных переходных процессов необходимо правильно смоделировать, надёжно рассчитать не только ЭМПП, но и низкочастотные длительные переходные режимы (ДПР). Однако до последнего времени существующие методики, как у нас так и за рубежом [1 – 4], не позволяют правильно и надёжно провести расчет этих режимов. Приведенная далее методика позволяет ликвидировать этот пробел.

Следует отметить, что существующие программные реализации расчета ДПР до настоящего времени в основном базировались на одномашинной мо-

It is shown that the calculation interval of time on which a full system of differential equations of a synchronous machine is numerically integrated can be increased only after removing the rigidity in the equations of damping circuits. To this end, it is advisable to use a model of damping circuits that takes into account by one equivalent circuit in the direct and quadrature axes. It is pointed out that statements in favor of making a shift to the model of average motion in performing calculations of long-term transients are incorrect. A procedure for calculating long-term transients complying with the requirements of industry-grade application is developed. Example calculations of long-term transients carried out using the proposed procedure are presented, in which accidents in the power systems of Ural and Tatarstan are simulated and which allow these accidents to be investigated.

Key words: power systems, transients, control of frequency and power, calculation

дели ЭЭС, где единая частота определяется из уравнения среднего движения по общему балансу генерации и нагрузки [2]. Такая модель может использоваться только для определения частоты в послеаварийных установившихся режимах. В объединённых энергосистемах с удалёнными друг от друга генерирующими и нагрузочными узлами и при наличии слабых связей между ними указанная модель расчета ДПР в ЭС не приемлема.

Необходимо учесть, что реальные изменения узловых частот, на которые реагирует АЧР-1 (составляющие более 50% всего объёма АЧР) в пределах одной секунды, могут существенно отличаться друг от друга. Поэтому указанные изменения частоты следует определять из уравнений ЭМПП, а не из уравнений среднего движения. Для анализа ДПП на всех его стадиях уравнения ЭМПП должны быть дополнены уравнениями теплосилового оборудования, автоматической частотной разгрузки и повторного включения, а также уравнениями центрального и станционных регуляторов частоты и активной мощности.

Отметим, что использование полной модели дифференциальных уравнений энергоблока синхронной машины (СМ), позволяющей теоретически рассчитать все стадии переходного процесса на длительном временном отрезке, требует:

¹ В порядке обсуждения. *Ред.*

значительных временных ресурсов в процессе расчёта;

значительной устойчивости метода численного интегрирования, предохраняющей от накопления шаговых ошибок.

Поэтому применение такой модели СМ вряд ли целесообразно для промышленных целей. Такая модель может быть использована только для проведения тестовых расчетов.

Следует также заметить, что полная система дифференциальных уравнений СМ является жёсткой. Так называются динамические системы, включающие наряду с большими постоянными времени относительно малые постоянные времена, определяющие соответственно низкочастотные и высокочастотные составляющие переходного процесса. При численном интегрировании этих систем уравнений приходится выбирать очень малый шаг по сравнению с желаемым интервалом интегрирования. Использование для полной модели неярких или неявных методов, связанных с решением разностных уравнений, не дает желаемых результатов.

Неяркие методы эффективны лишь в тех случаях, когда отфильтрованные высокочастотные составляющие при увеличении шага интегрирования не изменяют динамических свойств низкочастотных и среднечастотных составляющих.

В полные уравнения демпферных контуров входят высокочастотные составляющие следящих систем, определяя жесткость таких систем.

С увеличением шага интегрирования до $h = 0,1$ с высокочастотные составляющие искажают действия демпферных контуров. При этом отрицательные обратные связи нарушаются. Динамическая система становится численно неустойчивой. Увеличение шага интегрирования в этом случае возможно только после устранения жесткости в уравнениях демпферных контуров. Для этой цели целесообразно использовать более упрощенную модель демпферных контуров, учитывающую по одному эквивалентному контуру в поперечной и продольной осях СМ, в которых отсутствуют высокочастотные составляющие.

Как показали исследования, именно такая модель СМ может быть рекомендована для практических расчетов ДПП.

Следует также заметить, что широко распространенные утверждения в технической литературе, как у нас так и за рубежом, о целесообразности при затухании ЭМПП перехода к расчетной модели среднего движения (СД) являются ошибочными [1]. Как показали исследования, дело здесь не только в принципиальной невозможности разра-

ботки адекватных алгоритмов переключения модели расчета ЭМПП на модель СД и обратно, а в их практической нецелесообразности, не говоря уже о возникающих алгоритмических погрешностях в таких переключениях. Многочисленные исследования таких переключений не дали положительных результатов.

Предлагаемая методика расчета длительных переходных процессов. Результатом проведенных последних исследований стал выбор методики расчета длительных переходных процессов. Основные положения этой методики состоят в следующем.

1. На всем временном отрезке расчета длительного переходного процесса устанавливается неизменная расчетная модель СМ, максимально учитывающая один эквивалентный демпферный контур по продольной оси с постоянной времени $t_{q\Delta} = 0,5, 1,0$ с и один эквивалентный контур по поперечной оси с постоянной времени $t_{d\Delta} = 3, 10, 0$ с.

Такая упрощенная модель синхронной машины может быть представлена в следующем виде (обозначения общепринятые):

$$\begin{aligned} U_d &= -x_q \dot{\varphi}_q + E_{\varphi}; \quad U_q = +x_d \dot{\varphi}_d + E_{\varphi}; \\ t_{q\Delta} p E_{\varphi} &= [(x_q - x_q) i_q - E_{\varphi}]; \\ t_{d\Delta} p E_{\varphi} &= [E_{qe} + (x_q - x_q) i_d - E_{\varphi}]; \\ p s &= -\frac{1}{t_j} (m_T - m_{\Delta}); \quad m_T = \frac{P_{T.НОМ} m_T p_s}{1+s}; \\ m_{\Delta} &= \frac{E_{\varphi} i_q + E_{\varphi} i_d}{1+s}; \quad x_{\varphi} = 0,5(x_{\varphi} + x_{\varphi}). \end{aligned}$$

Здесь $P_{T.НОМ}$ – номинальная мощность турбины; m_T, m_{Δ} – механический момент турбины и ее электромагнитный момент; m_T – открытие регулирующих клапанов паровой турбины или открытие направляющего аппарата гидротурбины; p_s – давление пара перед турбиной для ТЭС и $p_s = 1$ для ГЭС.

Приведенная упрощенная модель является для большинства практических случаев вполне приемлемой математической модификацией синхронной машины в условиях неполной или недостоверной информации обо всех параметрах СМ.

Как показал опыт расчетов, эта модель дает приемлемую погрешность и определяет допустимую границу дальнейших упрощений. В указанной модели параметры $x_d, x_q, x_{\varphi}, x_{\varphi}, t_{d\Delta}, t_{q\Delta}$ являются практически достоверными и могут быть получены из соответствующих справочных материалов.

Приведенная модель менее жесткая, чем более полные модели и допускает при применении неярких методов численного интегрирования и отсутствии на расчетном интервале коммутационных изменений увеличение шага интегрирования до 0,1 с.

Следует особо отметить, что в указанной упрощенной модели синхронной машины статизм по токам демпферных контуров остается таким же, как и в полной модели. Обоснованность применения такой модели СМ рассмотрена в [5].

2. Расчет длительного переходного процесса осуществляется следующим образом. На заданном начальном участке продолжительностью $T_{p1} = 5, 15$ с проводится расчет ЭМПП с малым шагом интегрирования $h = 0,01, 0,02$ с. С этой же дискретностью проводится контроль действий ПА и выполнение в случаях необходимости коммутационных изменений. В конце участка T_{p1} проводится первый контроль и проверка затухания ЭМПП по следующим критериям:

$$\max |s_j - s_k| \leq \epsilon_3 \text{ и } \max \left| \frac{ds_i}{dt} \right| h \leq \epsilon_3, \quad (1)$$

где $|s_j - s_k|$ – модуль взаимного скольжения j -го и k -го генераторов; $\left| \frac{ds_i}{dt} \right|$ – модуль производной скольжения i -го генератора; ϵ_3 – значение допустимого затухания.

При выполнении условий (1) и отсутствии в конце участка T_{p1} коммутационных изменений в динамической системе происходит переход на следующий временной участок продолжительностью $T_{p2} = nH$, где n – число шагов интегрирования длительностью H ; H – увеличенный шаг интегрирования $H = 0,1$ с.

При невыполнении условий (1) расчет переходного процесса продолжается с шагом h . С этой же дискретностью проводится контроль и выполнение коммутационных изменений. При этом последующий контроль условий (1) происходит уже через каждый интервал времени h .

Расчет переходного процесса на отрезке $T_{p2} = nH$ начинается после выполнения условий (1) и продолжается до тех пор, пока не появится необходимость проведения коммутационных изменений в конце этого отрезка. При отсутствии коммутационных изменений расчет дифференциальных уравнений продолжается с шагом H .

Проверка заданных условий затухания здесь проводится также с дискретностью H . При этом проверка выполнения коммутационных изменений происходит в конце каждого интервала H . При возникновении здесь коммутационных изменений последующий расчет переходного процесса начи-

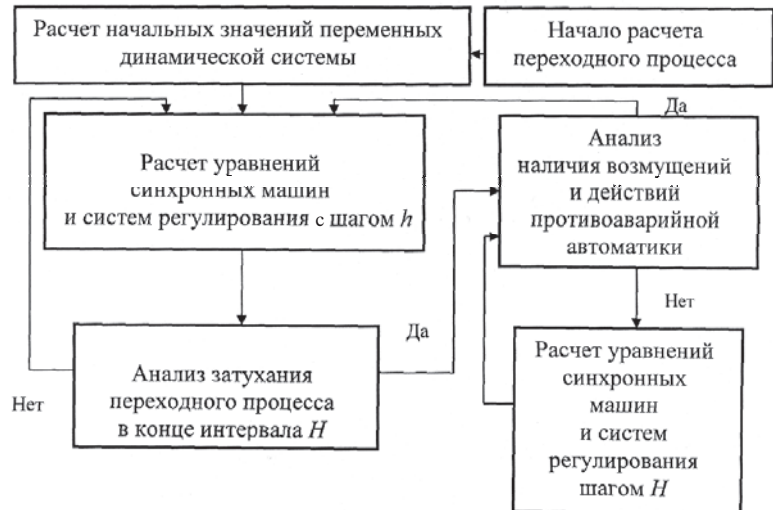


Рис. 1. Принципиальная схема расчета длительных переходных процессов с переменным шагом интегрирования

нает проводиться шагом h до выполнения условий (1).

Следует отметить, что расчет начальных значений переменных в рассмотренной методике расчета длительного переходного процесса проводится только один раз в начале расчета.

На рис. 1 приведена принципиальная схема расчета ДПП с шагом интегрирования переменной длины.

Последовательность численного решения дифференциальных (разностных) уравнений синхронных машин и систем регулирования на расчетном интервале. При решении дифференциальных или разностных уравнений на расчетном интервале используются особенности конкретной структурной схемы, определяющей связь между собой переменных исследуемой динамической системы. В результате этого решение систем дифференциальных или разностных уравнений сводится к последовательному упорядоченному расчету уравнений отдельных звеньев этой системы. Последовательность расчета разностных уравнений отдельных звеньев системы представлена на рис. 2.

Необходимо отметить, что для увеличения точности в начале каждого расчетного интервала предсказываются (прогнозируются) неинтегрируемые переменные, входящие в правые части расчетных уравнений и связанные между собой матричным уравнением сети. К таким переменным относятся электромагнитные моменты синхронных машин m_{Σ} , входящие в правые части уравнений движения СМ.

Как показал опыт расчетов, прогноз электромагнитного момента достаточно осуществлять используя формулу линейной экстраполяции, а именно:

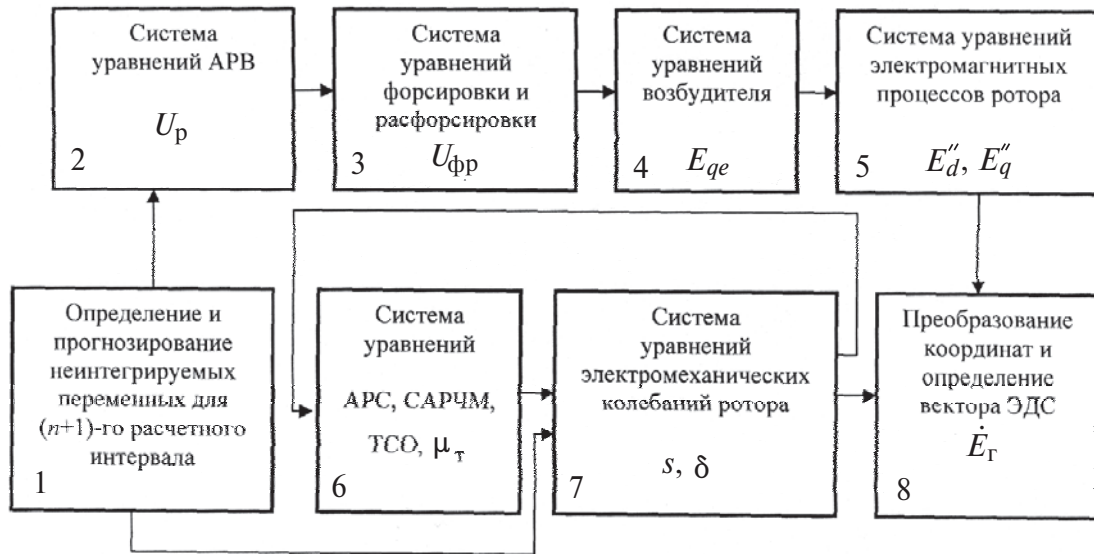


Рис. 2. Последовательность расчета систем разностных уравнений синхронной машины и систем регулирования на расчетном интервале

$$m_{\varepsilon(n+1)} = m_{\varepsilon n} + Dm_{\varepsilon(n+1)}^{\text{пр}},$$

где $Dm_{\varepsilon(n+1)}^{\text{пр}} = m_{\varepsilon n} - m_{\varepsilon(n-1)}$; $m_{\varepsilon(n-1)}$, $m_{\varepsilon n}$, $m_{\varepsilon(n+1)}$ — значения электромагнитного момента на различных расчетных интервалах.

Следует иметь в виду, что указанный прогноз проводится только при отсутствии на расчетном интервале коммутаций в электрической сети.

Как показал опыт расчетов, прогнозирование неинтегрируемых переменных позволяет сократить число обращений к блоку расчета матричного уравнения до одного раза и тем самым значительно сократить общее расчетное время.

Как видно из рис. 2, системы уравнений АРС и движений ротора СМ должны решаться совместно, так как связаны между собой переменной скольжения s . Однако из-за относительно больших эквивалентных постоянных времени (для гидротурбин) и T_p (для тепловых турбин) уравнения в указанных системах с допустимой погрешностью могут решаться также раздельно. При этом для уменьшения погрешности решения вводится прогноз интегрируемой переменной s .

Примеры расчета длительных переходных процессов. На рис. 3 приведены результаты расчета ДПП на временном отрезке 50 с, воспроизводящего аварию 09.09.00, связанную с выделением Белоярской АЭС (БАЭС) Восточного энергорайона Свердловэнерго. Расчет проводился по программному комплексу ДАКАР на схеме ОДУ Урала, содержащей 827 узлов, с учетом реакции теплосилового оборудования (ТСО) электростанций с различными типами регуляторов давления пара. При регистрации этих событий было зафиксировано, что после от-

ключения 3-го блока РфГРЭС и БАЭС частота с 52 Гц уменьшилась до 49 Гц.

При этом оставшиеся 1-й и 2-й блоки РфГРЭС вместо набора генерирующей мощности начали ее сбрасывать на 200–250 МВт. В результате этого частота резко упала до 45 Гц, усугубляя дальнейшее развитие аварии до полного отключения энергоснабжения в этом районе.

Неправильная реакция регуляторов ТСО РфГРЭС на изменения частоты была вызвана наличием здесь регуляторов «до себя», которые блокировали действия регуляторов скорости турбин и привели к дальнейшему развитию аварии.

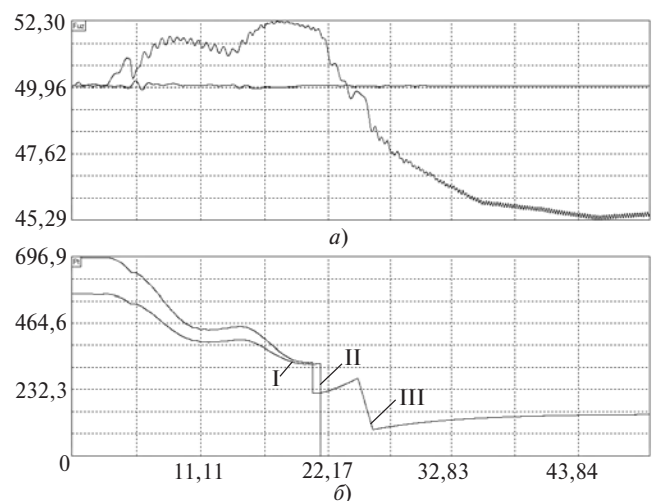


Рис. 3. Изменение параметров режима при выделении БАЭС, Восточного энергорайона Свердловэнерго и Северного энергорайона Челябинэнерго (09.09.2000): а — частота энергосистемы и выделенного района; б — механическая мощность на валу турбины РфГРЭС и БАЭС; I — отключение 1-го блока РфГРЭС; II — отключение БАЭС; III — сброс мощности на 2-м и 3-м блоках РфГРЭС при частоте 48 Гц от действия регуляторов «до себя»

На рис. 4 приведены результаты расчета возникшей аварийной ситуации при блокировке регуляторов «до себя» на РфГРЭС. Из анализа результатов расчета видно, что в этом случае после отключения БАЭС развития аварии могло и не быть.

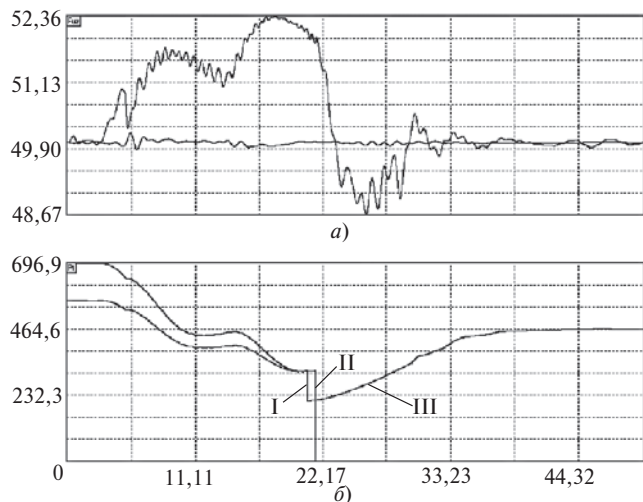


Рис. 4. Изменения параметров режима (при событии 09.09.2000), которые могли бы иметь место при блокировке регуляторов «до себя» на РфГРЭС: *a, б* – см. рис. 3; I – отключение 1-го блока РфГРЭС; II – отключение БАЭС; III – набор мощности на 2-м и 3-м блоках РфГРЭС

В нормальных режимах работы энергосистемы баланс активной мощности поддерживается устройствами автоматического регулирования скорости вращения (АРС) в рамках существующего регулировочного диапазона с учетом частотных характеристик нагрузки. За пределами указанного регулировочного диапазона поддержание на допустимых уровнях изменения частоты перекладывается на устройства автоматического отключения и повторного включения нагрузки (АЧР и ЧАПВ). Хотя действия АЧР связаны с определенным ущербом, этот ущерб значительно меньше того, который имеет место без АЧР, когда снижение частоты приводит к полному развалу энергообъединения.

Моделирование действий АЧР и ЧАПВ в течение ДПП было проведено для схемы энергосистемы Республики Татарстан. Анализировалась ситуация аварийного отключения линий связи с выделением на изолированную работу энергорайона в окрестности ТЭС-4. Результаты расчета на рис. 5 воспроизводят все этапы развития аварии с действием ПА, начиная с момента выделения ТЭС и кончая несинхронным включением ее в энергосистему.

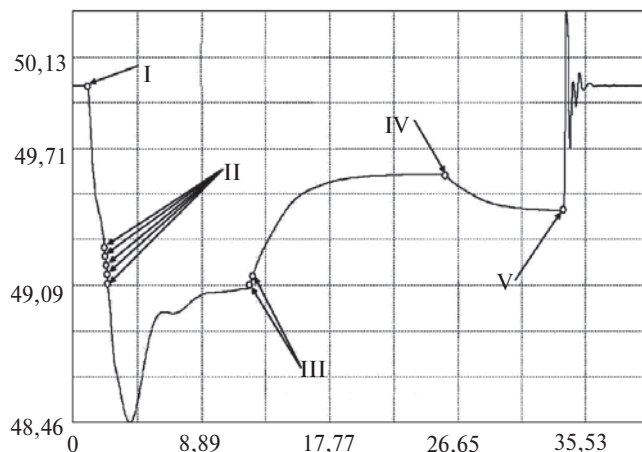


Рис. 5. График изменения частоты на шинах ТЭС-4 при выделении ее на изолированный режим работы с последующим несинхронным включением в энергосистему Республики Татарстан с учетом действий АЧР1, 2 и ЧАПВ: I – момент выделения ТЭС-4 на изолированную работу; II – моменты включения очереди АЧР1; III – то же АЧР2; IV – то же ЧАПВ; V – момент несинхронного включения ТЭС-4 в энергосистему

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоханин Е.К. Методика расчета и анализа длительных переходных режимов. – Электричество, 1995, № 12.
2. Лукашов Э.С., Калужный А.Х., Лизалек Н.Н. Длительные переходные процессы в энергетических системах. – Новосибирск: Наука, 1985.
3. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике/Под общ. ред. Ю.Н. Руденко и В.А. Семенова. – М.: Изд-во МЭИ, 2000.
4. CIGRE TF 38-02-08/ Long Term Dynamics Phase II. Final Report Convenor M.STUBBE (Belgium).
5. Лоханин Е.К. Упрощение уравнений синхронной машины для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости энергосистемы. – Электричество, 2000, № 4.

[27.05.13]

Авторы: Лоханин Евгений Константинович окончил гидроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1957 г. В 1993 г. защитил докторскую диссертацию «Методы расчета и анализа стационарных и переходных режимов сложных энергосистем» в С.Петербургском техническом университете. Начальник лаборатории противоаварийного управления ООО «Институт «Энергосетьпроект».

Россовский Ефим Львович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1963 г. Старший научный сотрудник лаборатории противоаварийного управления ООО «Институт «Энергосетьпроект».