

С. Г. АКОНИН, П. А. МАТЕВОСЯН

## ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МНОГОМАШИНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Для исследования электромеханических переходных процессов в многомашиной энергосистеме широко применяются цифровые и аналоговые универсальные вычислительные машины [1, 2, 4]. Однако, учитывая целый ряд недостатков универсальных машин, за последние годы в практику проектирования и эксплуатации энергосистем внедряются специализированные аналоговые вычислительные машины (АВМ), которые основаны как на параллельном, так и последовательно-параллельном принципах действия [1 - 4].

При решении задач, связанных с проектированием и эксплуатацией противоаварийной автоматики, возникает потребность в большом числе повторных решений одних и тех же уравнений при различных подбираемых параметрах. Решение подобных задач с помощью цифровых машин (ЦМ) или специализированных АВМ с последовательным принципом действия требует затрат значительного машинного времени [3]. В связи с этим представляется целесообразным применение известного в аналоговой технике принципа параллельного расчета для построения специализированной АВМ. Такого типа специализированные АВМ, созданные в ряде организаций СССР [1 - 4], основываются на сопряжении модели сети переменного тока (МСПТ) с элементами АВМ.

Наряду с целым рядом удобств применения МСПТ, позволяющих моделировать электрическую сеть с большим числом узловых точек, сопряжение МСПТ с решающими блоками АВМ постоянного тока требует использования дополнительных преобразователей напряжения постоянного тока в переменный и переменного в постоянный. Кроме того, такое сопряжение требует двух различных типов источников питания, различной измерительной аппаратуры и др. В работе [4] описан метод моделирования электрической сети трансцендентными уравнениями, выраженными через активные и реактивные мощности. Модель сети при этом строится на решающих блоках постоянного тока. Кроме того, не требуется применение преобразователей координатных осей. Однако, построение модели электрической сети по этому ме-

году требует использования значительного числа решающих блоков, тем более, когда моделируется электрическая сеть, имеющая число ветвей больше, чем число узлов. Описанный в [4] метод моделирования электрической сети на основе уравнений, составленных по закону Ома для участка линии и по первому закону Кирхгофа, также требует значительного количества аппаратуры и, кроме того, в некоторой степени затрудняет обеспечение устойчивости решения уравнений на АВМ.

В связи с изложенным представляется целесообразным создание специализированной АВМ, основанной на параллельном принципе действия, работающей на одном напряжении, электрическая сеть которой моделируется на основе уравнений узловых напряжений.

Создание подобной специализированной АВМ требует решения целого ряда вопросов, связанных с разработкой наиболее рациональной математической модели, выбором средств аналоговой техники, а также с решением вопросов, связанных с обеспечением структурной устойчивости схемы моделирования и точности решения.

Следует отметить, что наряду с обеспечением высокого быстродействия, рассматриваемый принцип моделирования имеет и свой недостаток, который обусловлен тем, что количество требуемых решающих элементов АВМ возрастает с увеличением числа синхронных машин и нагрузок в моделируемой энергосистеме. С помощью разработанной специализированной АВМ предполагается моделировать энергосистему, содержащую до 10—12 электрических машин и нагрузок.

Одним из основных вопросов при создании специализированной АВМ для исследования электромеханических переходных процессов многомашинной энергосистемы является моделирование уравнений электрической сети.

В предлагаемом методе моделирования уравнения сети записываются в комплексной форме, где действительная ( $A$ ) и мнимая ( $B$ ) оси совмещаются с синхронно-вращающимися осями  $q$  и  $d$ .

При моделировании система  $n$  комплексных уравнений узловых напряжений представляется в виде системы  $2n$  уравнений с действительными коэффициентами вида:

$$\begin{bmatrix} B & G \\ G & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $B$  и  $G$  — соответственно матрицы реактивных и активных проводимостей  $n$ -го порядка;

$e_q, e_d, i_d, i_q$  — многомерные векторы: проекций напряжений (относительно базисного узла) и токов на синхронные оси.

Основным преимуществом моделирования электрической сети уравнениями (1) при построении специализированной АВМ, предназначенной для исследования электромеханических переходных процессов в многомашинной энергосистеме, является использование решающих

блоков АВМ, работающих на постоянном токе. Наряду с этим основной трудностью при моделировании уравнений (1) на АВМ является обеспечение „структурной устойчивости“ решения.

Как показывают исследования [5, 6], на устойчивость решения уравнений существенное влияние оказывают паразитные параметры решающих блоков. При этом решение на АВМ может быть не устойчивым, несмотря на то, что физический процесс, описываемый моделируемыми уравнениями, устойчив.

Моделирование уравнений (1) на устройстве электрической сети осуществляется по непосредственному методу. Для обеспечения устойчивого решения предлагается ряд методов [5, 7, 8].

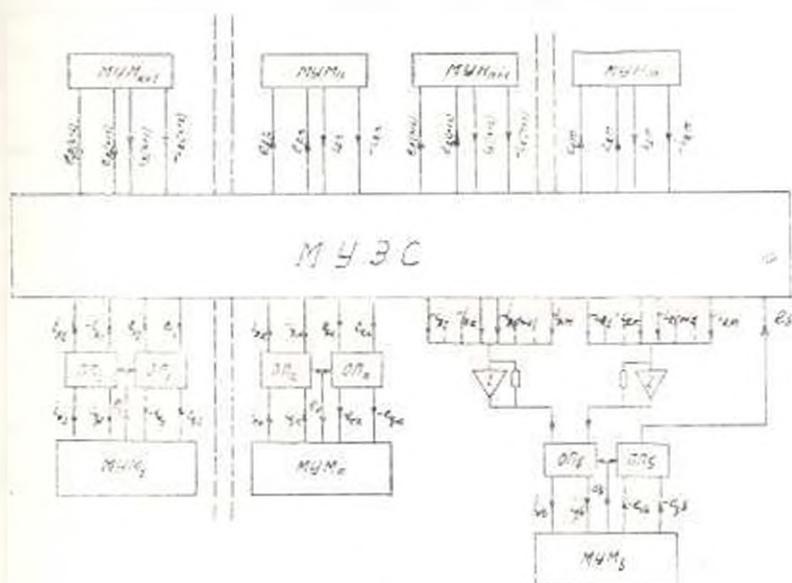


Рис. 1.

Блок-схема моделирования многомашинной энергосистемы представлена на рис. 1. Схема включает в себя моделирующие устройства электрической сети (МУЭС), моделирующие устройства синхронных и асинхронных машин (МУМ), моделирующее устройство нагрузочных узлов (МУН), блоки прямых (ПП) и обратных (ОП) преобразователей системы координатных осей. Блок-схема построена для общего случая, когда в модели сети отсутствуют поперечные элементы. В этом случае при составлении уравнений сети в качестве базисного узла принимается тот, к которому подключена наиболее мощная станция. Так как для решения уравнений электрической сети напряжение базисного узла должно быть заданным, то в схеме моделирования базисной станции входными величинами (МУМ<sub>б</sub>) должны быть проекции тока, а выходными — напряжения.

Здесь с помощью двух сумматоров (1 и 2) осуществляется алгебраическое суммирование напряжений, пропорциональных проекциям всех

токов, входящих в узлы энергосистемы, а на выходе этих сумматоров получаются напряжения, пропорциональные проекциям токов  $i_{d0}$  и  $i_{q0}$  базисного узла на ортогональные синхронно-вращающиеся оси  $A$  и  $R$ . Напряжения, пропорциональные  $i_{d0}$  и  $i_{q0}$ , подаются на входы обратного преобразователя ОП<sub>1</sub>, на выходе которого получаются напряжения, пропорциональные проекциям токов  $i_{d1}$  и  $i_{q1}$  на оси  $d$  и  $q$  синхронной машины базисного узла.

Вектор напряжения базисного узла обычно совмещают с действительной осью комплексной плоскости, тогда  $e_{d0} = 0$ . Поэтому для обратного преобразования остается только одно уравнение. С выходов модели МУМ<sub>0</sub> величины  $e_{d0}$ ,  $e_{q0}$  и  $\psi_0$  подаются на входы ПП<sub>1</sub>, а на выходе его получается напряжение  $e_1$ , которое используется для образования фазных напряжений в моделях генераторных и нагрузочных узлов.

Для остальных МУМ входными переменными являются  $e_d$ ,  $e_q$ , а выходными  $i_d$ ,  $i_q$ . При этом уравнения каждой синхронной машины написаны относительно осей  $d$  и  $q$ , жестко связанных с ее ротором. В связи с этим для совместного решения уравнений электрической сети и синхронных генераторов, требуется использовать в схеме моделирования преобразователи координатных осей, с помощью которых моделируются известные уравнения [4] преобразования систем координатных осей.

Если в электрической сети имеется хотя бы один поперечный элемент, то в качестве базисного узла удобно принимать нулевую точку (землю), этому соответствует  $e_0 = 0$ , а в схеме (рис. 1) будет отсутствовать блок МУМ<sub>0</sub>.

При моделировании асинхронного двигателя уравнения [4] удобно записывать в синхронных осях  $A$  и  $R$ , что позволяет сократить использование преобразователей систем координатных осей. Входными величинами асинхронных машин (МУМ<sub>1</sub>) принимаются проекции напряжения  $e_d$  и  $e_q$ , а выходными  $i_d$  и  $i_q$ .

При моделировании нагрузок энергосистемы шунтом постоянной проводимости или статическими характеристиками по напряжению и по постоянству активной и реактивной мощности не требуются преобразователи ПП и ОП. Для этих МУМ входными величинами являются  $e_d$  и  $e_q$ , а выходными  $i_d$  и  $i_q$ . При моделировании уравнений сложной многомашинной энергосистемы в зависимости от схемы исследуемой системы, от места возмущения, от характера и длительности переходного процесса возникает потребность в моделировании как полных уравнений синхронных генераторов и нагрузок, так и уравнений с рядом допущений, не оказывающих существенного влияния на переходный процесс, но в значительной степени упрощающих блок-схему моделирования. В связи с этим схема специализированной АВМ (рис. 1) позволяет моделировать уравнение синхронных и асинхронных машин, а также их регуляторов как упрощенными, так и подробными уравне-

ниями [4]. Рассматриваемая схема позволяет осуществлять отладку каждого отдельного моделирующего устройства узла энергосистемы независимо друг от друга, обеспечивать структурную устойчивость.

Схема управления разработанной специализированной АВМ предусматривает автоматическое изменение коэффициентов уравнений электрической сети в процессе решения при изменении режимов работы энергосистемы. Например, позволяет моделировать аварийные и послеварийные режимы. Так, при рассмотрении режима короткого замыкания, как известно, к соответствующему узлу подключается шунт к. з. на время протекания короткого замыкания; на АВМ последнее может быть осуществлено либо путем подключения к нагрузке с постоянным сопротивлением, либо путем суммирования проводимости шатуна с соответственной проводимостью узла. Подключение шунта осуществляется автоматически на время протекания к. з. с последующим отключением.

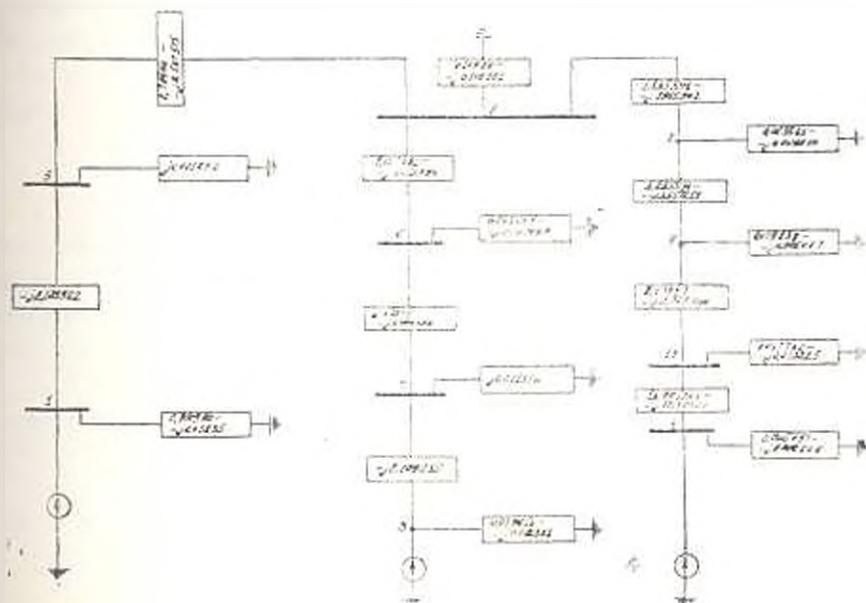


Рис. 2.

На рассматриваемой специализированной АВМ можно проводить исследование как кратковременных, так и длительных электромеханических переходных процессов. Исследуемый процесс на АВМ рассматривается с замедлением в 10 и более раз, что удобно для наблюдения за ходом решения.

Установление начального режима непосредственно на АВМ можно осуществить несколькими способами. В частности, представляется удобным по заданным значениям активной и реактивной мощностей всех генераторов и заданным значениям полных сопротивлений нагрузочных узлов, рассчитанным по потребляемым активным и реактивным

мощностям, на АВМ установить значения моментов турбин  $M_T$ . После чего осуществляется пуск решения и так как на выходах интеграторов имеет место небаланс токов, связанный с несоответствием заданных и получаемых переменных, начинается переходный процесс. По окончании этого процесса устанавливается определенный режим, несколько отличающийся от заданного нормального. Непосредственно в режиме „интегрирования“ подбираются значения  $e_i$  всех генераторов до тех пор, пока не будут получены заданные значения реактивных мощностей  $Q$  всех генераторов.

Ниже приводится пример и осциллограмма решенной задачи, иллюстрирующие практическое применение предлагаемого метода моделирования. Расчетная схема замещения рассматриваемой энергосисте-

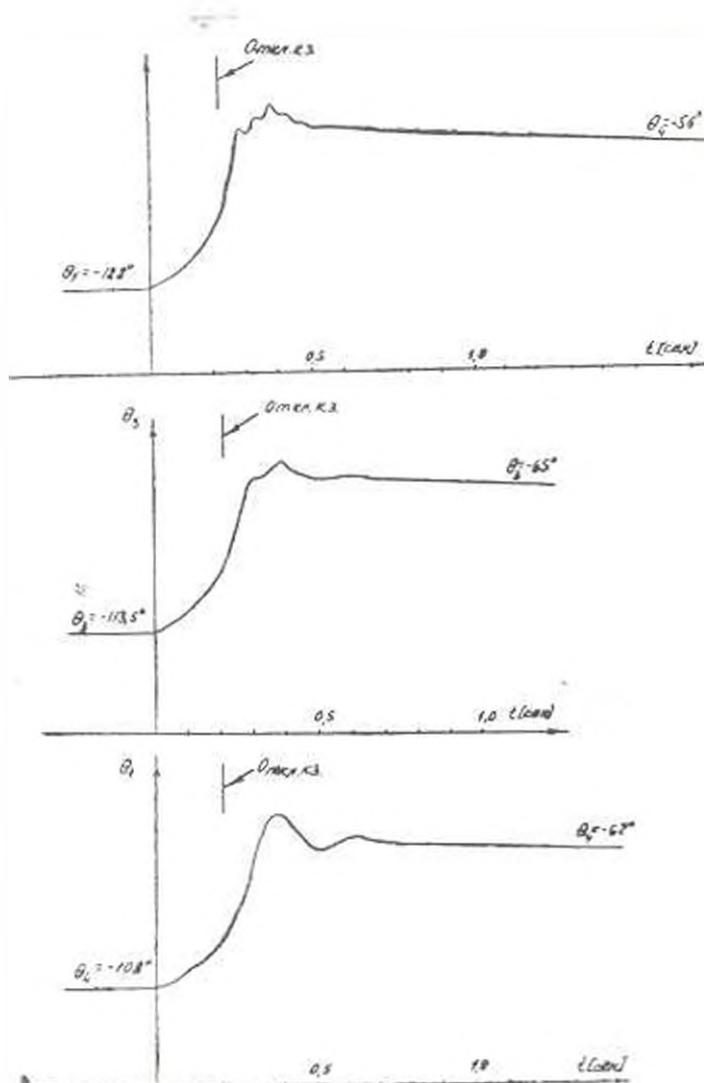


Рис. 3.

мы, представленная на рис. 2 включает три эквивалентных генераторных станций. Нагрузки рассматриваемой энергосистемы учитывались постоянной проводимостью и включены в параметры уравнений сети энергосистемы, а проводимость нагрузки узла 2 не включалась в сеть и моделировалась с помощью двух сумматоров.

Турбогенераторы исследуемой энергосистемы моделировались уравнениями с учетом уравнений регуляторов скорости и напряжения при условии равенства параметров по продольной и поперечной осям. Решение рассматриваемой задачи выполнялось на машине МН-14. Был исследован режим несимметричного двухфазного к. з. на подстанции 2 на землю с различной длительностью отключения к. з. На рис. 3 приведена осциллограмма изменения роторных абсолютных углов синхронных машин для случая отключения к. з. через 0,22 сек и частичного сброса нагрузки узла 2.

Лабораторный макет аналогового моделирующего устройства электрической сети, предназначенный для сопряжения с машиной МН-14 для моделирования многомашинной энергосистемы, содержащей до 12 узлов, разработан и изготавливается в лаборатории аналогового моделирования энергосистем Арм НИИЭ.

### В ы в о д ы

1. Разработанный принцип моделирования электрической сети энергосистемы позволяет создание специализированной АВМ на базе использования только решающих блоков аналоговой техники, предназначенной для исследования электромеханических переходных процессов в многомашинной энергосистеме.

2. Предложенный метод позволяет на специализированной АВМ исследовать как кратковременные, так и длительные электромеханические переходные процессы.

Арм НИИЭ

Поступило 9.VI.1970.

© 1971, 1972, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025

ԱՅՏՈՒՆՆԵՐԻՆ ԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ԷԼԵՏՐՈՒԿԱԿԱՆ ԵՎ ՄԵԿԱՆԻԿԱԿԱՆ ԱՆՈՒՄՆԵՐԻ  
ՊՐԻՆԿԻՆԵՐԻ ԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ԴՐՈՒՄՆԵՐԻ ԵՎ ԴՐՈՒՄՆԵՐԻ ԴՐՈՒՄՆԵՐԻ

### Ա մ փ ո փ ո ս մ

Ի տարրերում ընդհանուր կերպով մտնող մտնողների հարցերի մեթոդների, հարցաձևում առաջարկվում է էլեկտրական ցանցի մոդելավորել հանդույրային լարումների համաարումներով, թերիվում է մասնագիտացված անալոգային հարցի մեթոդային բովանդակում, որը նախատեսված է ստուգման արդյունքի էլեկտրամեխանիկական անցողիկ պրոցեսները բազմամեթոդ կերպով նախատեսվում:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Горбунова А. М., Лузинский Я. П., Новаковский А. И. и др. Специализированная вычислительная машина для исследования переходных электрических процессов в энергосистемах. Доклад 4-ой межвузовской конференции. МЭИ, Сб. № 2, 1962.
2. Давидович В. В., Сазанов В. К., Соколов Н. И. Комбинированная модель для расчета сложных энергосистем. Доклад 5-ой межвузовской конференции. Изд-во „Энергия“ Москва, 1968.
3. Аюбян С. Г., Абрамян Г. А., Аюбян С. Г., Гамбурия К. А., Ешиларян А. Н., Матевосян П. А., Мусаслик А. Н., Мурадян С. Г. Автоматизированная модель энергосистемы. Авторское свидетельство № В-2288 по заявке № 1042308/26 от 10 декабря 1965.
4. Груздев И. А., Кадомская К. И., Кучумов А. А., Лузинский Я. П., Партиной М. Г., Соколов Н. И. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Изд-во „Энергия“, 1964.
5. Матевосян П. А. Некоторые вопросы построения электронных устройств для решения алгебраических уравнений. Труды Института машиноведения. Изд. АН СССР, № 15, 1961.
6. Тарисов В. С. Анализ влияния малых параметров операционных усилителей на точность решения задач устойчивости. Доклад 4-й межвузовской конференции. МЭИ, Сб. № 3, 1962.
7. Пухов Г. Е. Избранные вопросы теории математических машин. Изд. АН УССР, Киев, 1964.
8. Аюбян С. Г. Аналоговое моделирование электрической сети. „Известия АН СССР. Энергетика и транспорт“, № 1, 1970.