

Из опыта работы

Гибридное моделирование линии электропередачи с распределенными параметрами с учетом электромагнитного взаимодействия¹

СУЛАЙМАНОВ А.О., БОРОВИКОВ Ю.С., ГУСЕВ А.С.

Разработана всережимная математическая модель многоцепной трехфазной линии электропередачи с распределенными параметрами с учетом электромагнитного взаимодействия. Модель реализована в виде гибридного процессора в составе всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем.

Ключевые слова: линии электропередачи, распределенные параметры, гибридное моделирование, электромагнитное взаимодействие

Концепция всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем (ЭЭС), исключающая необходимость принципиально значимых упрощений и ограничений для математических моделей элементов ЭЭС и условий их решения, предполагает использование гибридного подхода к моделированию [1]. При этом система дифференциальных уравнений, описывающая какой-либо объект ЭЭС, решается с помощью аналоговой вычислительной техники, а программно-функциональная управляемость — с применением современных цифровых технологий. Необходимо заметить, что связь между гибридными процессорами, моделирующими элементы ЭЭС, осуществляется на физическом уровне, это позволяет решить принципиальную проблему разрешимости уравнений узла естественным образом.

При построении гибридных процессоров линий трехфазной электропередачи (ЛЭП) необходимо учитывать все возможные их типы и присущий им спектр процессов, в том числе процессы в ЛЭП различной протяженности или на любом ее участке, а также электромагнитное взаимодействие многоцепных и достаточно близко расположенных параллельных линий электропередачи.

Физическая сущность ЛЭП, особенно высокого и сверхвысокого напряжения длиной более 50 км,

The all-variable mathematical model of a multichain three-phase power line with the distributed parameters taking into account electromagnetic interference is developed. Model realization in the form of the hybrid processor as a part of a all-variable modeling complex of real time of power systems is given.

Key words: the power transmission lines, the distributed parameters, hybrid simulation, electromagnetic interference

предполагает, что во многих случаях оказывается целесообразным и часто необходимым учет распределенности параметров. При этом допустим приближенный учет активных поперечных проводимостей, а функциональное управление проводимостью позволяет также учитывать коронирование ЛЭП. Кроме того, в теории и практике моделирования ЭЭС принято симметричное представление ЛЭП в виде апробированной многолетней практикой расчетов системы уравнений [2, 3] (здесь — для одной фазы):

$$(L_{\Phi i} - M_{\text{мфи}}) \frac{\partial i_{Ai}}{\partial t} + r_{\Phi i} i_{Ai} + (L_{3i} + 3M_{\text{мфи}}) \frac{\partial i_{0i}}{\partial t} + r_{3i} 3i_{0i} = - \frac{\partial u_{Ai}}{\partial l_i}; \quad (1)$$

$$C_{\Phi i} \frac{\partial u_{Ai}}{\partial t} + 3C_{\text{мфи}} \frac{\partial (u_{Ai} - u_{0i})}{\partial t} = - \frac{\partial i_{Ai}}{\partial l_i},$$

где для некоторой i -й ЛЭП или ее участка: $L_{\Phi i}$ — индуктивность контура «фаза линии—обратный эквивалентный провод (земля)»; L_{3i} — дополнительная индуктивность контура «фаза—земля», обусловленная только магнитным потоком в земле; $M_{\text{мфи}}$ — взаимоиндуктивность между любыми двумя из трех контуров «фаза—земля»; $r_{\Phi i}$ — активное сопротивление провода фазы линии; r_{3i} — активное сопротивление обратного эквивалентного провода (земли); $C_{\Phi i}$ — емкость провода фазы относительно земли; $C_{\text{мфи}}$ — емкость между любыми двумя проводами фаз линии; i_{Ai} , u_{Ai} — мгновенные зна-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках государственного задания на НИР «Наука».

чения фазного тока и напряжения; i_{0i}, u_{0i} — мгновенные значения тока и напряжения нулевой последовательности; l_i — длина i -й ЛЭП или ее участка.

В связи с необходимостью учета магнитного и электростатического взаимовлияния параллельных линий или ее соответствующих участков, а также грозозащитных тросов, которое по данным многочисленных исследований [2, 3] проявляется преимущественно лишь в токах и напряжениях нулевой последовательности, часто используется их представление в системе несимметричных составляющих $a, b, 0$. Достоинством такой математической модели наряду с ее компактностью является естественное, а не дополнительное наличие уравнений, связывающих параметры, напряжения и токи нулевой последовательности, что значительно упрощает учет электромагнитного взаимовлияния параллельных цепей.

Для некоторой i -й ЛЭП или ее участка исходные уравнения в системе $a, b, 0$ приобретают вид [2]:

$$\begin{aligned} L_i \frac{di_{ai}}{dt} + r_i i_{ai} &= - \frac{du_{ai}}{dt}; & L_i \frac{di_{bi}}{dt} + r_i i_{bi} &= - \frac{du_{bi}}{dt}; \\ L_{0i} \frac{di_{0i}}{dt} + r_i i_{0i} &= - \frac{du_{0i}}{dt}; & C_i \frac{du_{ai}}{dt} &= - \frac{di_{ai}}{dt}; \\ C_i \frac{du_{bi}}{dt} &= - \frac{di_{bi}}{dt}; & C_{0i} \frac{du_{0i}}{dt} &= - \frac{di_{0i}}{dt}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $i_{ai}, i_{bi}, i_{0i}, u_{ai}, u_{bi}, u_{0i}$ — мгновенные значения токов и напряжений в системе $a, b, 0$; L_i, C_i, r_i — индуктивность, емкость и активное сопротивление трехфазной линии для прямой и обратной последовательности; L_{0i}, C_{0i}, r_{0i} — собственные индуктивность, емкость и активное сопротивление i -й трехфазной линии для нулевой последовательности.

В общем случае наиболее эффективен и удобен способ применения системы уравнений (2), учитывающий распределенность параметров линии электропередачи и поверхностный эффект в земле.

В основе указанного способа — известная методика представления и анализа электрических цепей с распределенными параметрами, базирующаяся на волновой интерпретации процессов в этих цепях [2]. По этой методике собственно распространение волн токов и напряжений изначально рассматривается применительно к полностью идеализированной линии. При этих условиях становится возможным получение общего решения системы (2), которое после выражения постоянных интегрирования через операторные изображения составляющих напряжения и тока в начале и в конце линии преобразуется в систему уравнений вида [2]:

$$\begin{aligned} U_{xni}(p) - Z_{xi} I_{xni}(p) &= \\ = [U_{xki}(p) - Z_{xi} I_{xki}(p)] e^{-pt_{xi}} e^{-s_{xi}}; & (3) \\ U_{xki}(p) + Z_{xi} I_{xki}(p) &= \\ = [U_{xni}(p) + Z_{xi} I_{xni}(p)] e^{-pt_{xi}} e^{-s_{xi}}, \end{aligned}$$

где индексами «н» и «к» условно обозначены начало и конец линии или ее участка; $x = a, b, 0$ — индекс составляющих системы $a, b, 0$; $Z_{xi} = \sqrt{L_{xi}/C_{xi}}$ — волновое сопротивление идеализированной линии для соответствующих составляющих системы $a, b, 0$; $t_{xi} = l_i \sqrt{L_{xi} C_{xi}}$ — постоянная изменения фазы волны соответствующих составляющих системы $a, b, 0$ в идеализированной линии длиной l_i ; $s_{xi} = (r_{xi}/(2Z_{xi}) + g_{xi}Z_{xi}/2)l_i$ — параметр затухания соответствующих составляющих системы $a, b, 0$, обусловленного потерями в реальной линии длиной l_i из-за $r_{xi} \neq 0$ и $g_{xi} \neq 0$.

Теоретические и экспериментальные исследования уравнений (3) [2] показали достаточно достоверное воспроизведение реального спектра процессов в ЛЭП за исключением режима коронирования, в условиях которого составляющая $g_{xi}Z_{xi}/2$ параметра s_{xi} , входящего в коэффициент затухания $e^{-s_{xi}}$, приближенно отражает влияние потерь, связанных с коронированием. Более точно это явление учитывается, как уже отмечалось, при соответствующем функциональном управлении этими параметрами.

Наряду с функциональным коэффициентом затухания $e^{-s_{xi}}$ волн напряжения и тока уравнения (3) содержат функцию запаздывания $e^{-pt_{xi}}$, отображающую изменение фазы этих волн. При переходе к оригиналам запаздывания уравнения (2) принимают вид:

$$\begin{aligned} U_{xni}(t) - Z_{xi} i_{xni}(t) &= \\ = [U_{xki}(t - t_{xi}) - Z_{xi} i_{xki}(t - t_{xi})] e^{-s_{xi}}; & (4) \\ U_{xki}(t) + Z_{xi} i_{xki}(t) &= \\ = [U_{xni}(t - t_{xi}) + Z_{xi} i_{xni}(t - t_{xi})] e^{-s_{xi}}, \end{aligned}$$

где $f(t - t_{xi})$ — функция запаздывания.

Модификация системы уравнений (4), необходимая для учета поверхностного эффекта в земле, вытекает из содержания выражений, определяющих Z_{xi}, t_{xi}, s_{xi} для нулевой последовательности: Z_{0i}, t_{0i}, s_{0i} , и рассмотренного способа отображения распространения токов нулевой последовательности фиксированных частот посредством трех параллельных r_{0i}, L_{0i} -ветвей: $r_{0i} \parallel L_{0i} \parallel r_{0i} \parallel L_{0i} \parallel r_{0i} \parallel L_{0i}$ если

явно выделить в указанных выражениях для Z_{0i} , t_{0i} , s_{0i} параметры r_{0i} и L_{0i} :

$$Z_{0i} = \sqrt{\frac{L_{0i}}{C_{0i}}} = \sqrt{\frac{L_{0Vi} + L_{3i}}{C_{0i}}};$$

$$t_{0i} = l_i \sqrt{L_{0i} C_{0i}} = l_i \sqrt{(L_{0Vi} + L_{3i}) C_{0i}}; \quad (5)$$

$$s_{0i} = \frac{r_{\phi i} + 3r_{3i}}{2 \sqrt{\frac{L_{0Vi} + L_{3i}}{C_{0i}}}} + \frac{g_{0i}}{2} \sqrt{\frac{L_{0Vi} + L_{3i}}{C_{0i}}};$$

где L_{0Vi} – составляющая индуктивности нулевой последовательности, обусловленная магнитным потоком в воздухе.

Из (5) видно, что последовательная замена r_{0i} и L_{0i} на $r_{\phi i}$, $L_{\phi i}$, r_{3i} , L_{3i} , $r_{\phi 3i}$, $L_{\phi 3i}$ приводит к образованию трех троек параметров нулевой последовательности и, соответственно, трех волновых каналов нулевой последовательности с указанными параметрами.

Вышеизложенное позволяет сформировать все-режимную математическую модель одноцепной трехфазной линии, однако полная универсальная все-режимная модель ЛЭП должна также обеспечивать, как уже отмечалось, возможность учета, нередко существенного, магнитного и электростатического взаимовлияния параллельных цепей.

Таким образом, можно составить систему уравнений универсальной все-режимной математической модели i -й многоцепной ЛЭП:

$$U_{a\phi i}(t) - Z_i i_{a\phi i}(t) = [U_{a\phi i}(t - t_i) - Z_i i_{a\phi i}(t - t_i)] e^{-s_i};$$

$$U_{a\phi i}(t) + Z_i i_{a\phi i}(t) = [U_{a\phi i}(t - t_i) + Z_i i_{a\phi i}(t - t_i)] e^{-s_i};$$

$$U_{b\phi i}(t) - Z_i i_{b\phi i}(t) = [U_{b\phi i}(t - t_i) - Z_i i_{b\phi i}(t - t_i)] e^{-s_i};$$

$$U_{b\phi i}(t) + Z_i i_{b\phi i}(t) = [U_{b\phi i}(t - t_i) + Z_i i_{b\phi i}(t - t_i)] e^{-s_i};$$

$$U_{0\phi i}(t) - Z_{\phi i} i_{0\phi i}(t) = [U_{0\phi i}(t - t_{\phi i}) - Z_{\phi i} i_{0\phi i}(t - t_{\phi i})] e^{-s_{\phi i}};$$

$$U_{0\phi i}(t) + Z_{\phi i} i_{0\phi i}(t) = [U_{0\phi i}(t - t_{\phi i}) + Z_{\phi i} i_{0\phi i}(t - t_{\phi i})] e^{-s_{\phi i}};$$

$$U_{0\phi i}(t) - Z_{\phi 3i} i_{0\phi 3i}(t) = [U_{0\phi i}(t - t_{\phi 3i}) - Z_{\phi 3i} i_{0\phi 3i}(t - t_{\phi 3i})] e^{-s_{\phi 3i}};$$

$$U_{0\phi i}(t) + Z_{\phi 3i} i_{0\phi 3i}(t) = [U_{0\phi i}(t - t_{\phi 3i}) + Z_{\phi 3i} i_{0\phi 3i}(t - t_{\phi 3i})] e^{-s_{\phi 3i}};$$

$$U_{0\phi i}(t) - Z_{\phi 0ki} i_{0\phi 0ki}(t) = [U_{0\phi i}(t - t_{\phi 0ki}) - Z_{\phi 0ki} i_{0\phi 0ki}(t - t_{\phi 0ki})] e^{-s_{\phi 0ki}};$$

$$U_{0\phi i}(t) + Z_{\phi 0ki} i_{0\phi 0ki}(t) = [U_{0\phi i}(t - t_{\phi 0ki}) + Z_{\phi 0ki} i_{0\phi 0ki}(t - t_{\phi 0ki})] e^{-s_{\phi 0ki}};$$

$$U_{0\phi i}(t) - Z_{\phi 0ki} i_{0\phi 0ki}(t) = [U_{0\phi i}(t - t_{\phi 0ki}) - Z_{\phi 0ki} i_{0\phi 0ki}(t - t_{\phi 0ki})] e^{-s_{\phi 0ki}};$$

$$U_{0\phi i}(t) + Z_{\phi 0ki} i_{0\phi 0ki}(t) = [U_{0\phi i}(t - t_{\phi 0ki}) + Z_{\phi 0ki} i_{0\phi 0ki}(t - t_{\phi 0ki})] e^{-s_{\phi 0ki}}; \quad (6)$$

$$i_{0\phi i}(t) = i_{\phi i}(t) + i_{\phi 3i}(t) + i_{\phi 0ki}(t);$$

$$i_{0\phi i}(t) = i_{\phi i}(t) + i_{\phi 3i}(t) + i_{\phi 0ki}(t);$$

$$U_{0\phi i}(t) = U_{\phi ii}(t) - U_{\phi i1}(t) - \dots - U_{\phi ij}(t) - \dots - U_{\phi in}(t);$$

$$U_{0\phi i}(t) = U_{\phi ki}(t) - U_{\phi k1}(t) - \dots - U_{\phi kj}(t) - \dots - U_{\phi kin}(t);$$

$$U_{a\phi i}(t) = \frac{2}{3} U_{A\phi i}(t) - \frac{1}{3} [U_{B\phi i}(t) + U_{C\phi i}(t)];$$

$$U_{b\phi i}(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [U_{B\phi i}(t) - U_{C\phi i}(t)];$$

$$U_{\phi ii}(t) = \frac{1}{3} [U_{A\phi i}(t) + U_{B\phi i}(t) + U_{C\phi i}(t)];$$

$$U_{a\phi i}(t) = \frac{2}{3} U_{A\phi i}(t) - \frac{1}{3} [U_{B\phi i}(t) + U_{C\phi i}(t)];$$

$$U_{b\phi i}(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [U_{B\phi i}(t) - U_{C\phi i}(t)];$$

$$U_{\phi ki}(t) = \frac{1}{3} [U_{A\phi i}(t) + U_{B\phi i}(t) + U_{C\phi i}(t)]; \quad (7)$$

$$i_{A\phi i}(t) = i_{0\phi i}(t) + i_{a\phi i}(t);$$

$$i_{B\phi i}(t) = i_{0\phi i}(t) + \frac{1}{2} i_{a\phi i}(t) + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{b\phi i}(t);$$

$$i_{C\phi i}(t) = i_{0\phi i}(t) - \frac{1}{2} i_{a\phi i}(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{b\phi i}(t);$$

$$i_{A\phi i}(t) = i_{0\phi i}(t) + i_{a\phi i}(t);$$

$$i_{B\phi i}(t) = i_{0\phi i}(t) - \frac{1}{2} i_{a\phi i}(t) + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{b\phi i}(t);$$

$$i_{C\phi i}(t) = i_{0\phi i}(t) - \frac{1}{2} i_{a\phi i}(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{b\phi i}(t), \quad (8)$$

где $Z_i = Z_{ai} = Z_{bi} = \sqrt{L_i / C_i}$ – волновое сопротивление для составляющих а, b, такое же, как и для составляющих прямой и обратной последовательности.

Полученная система уравнений с учетом (5) и разрешения основных уравнений относительно токов начала и конца образует универсальную все-режимную математическую модель многоцепной ЛЭП с распределенными параметрами и позволяет синтезировать на ее основе изображенную на рис. 1 функциональную операторную схему СПТЛ. Разработанная в соответствии с этой схемой и общими

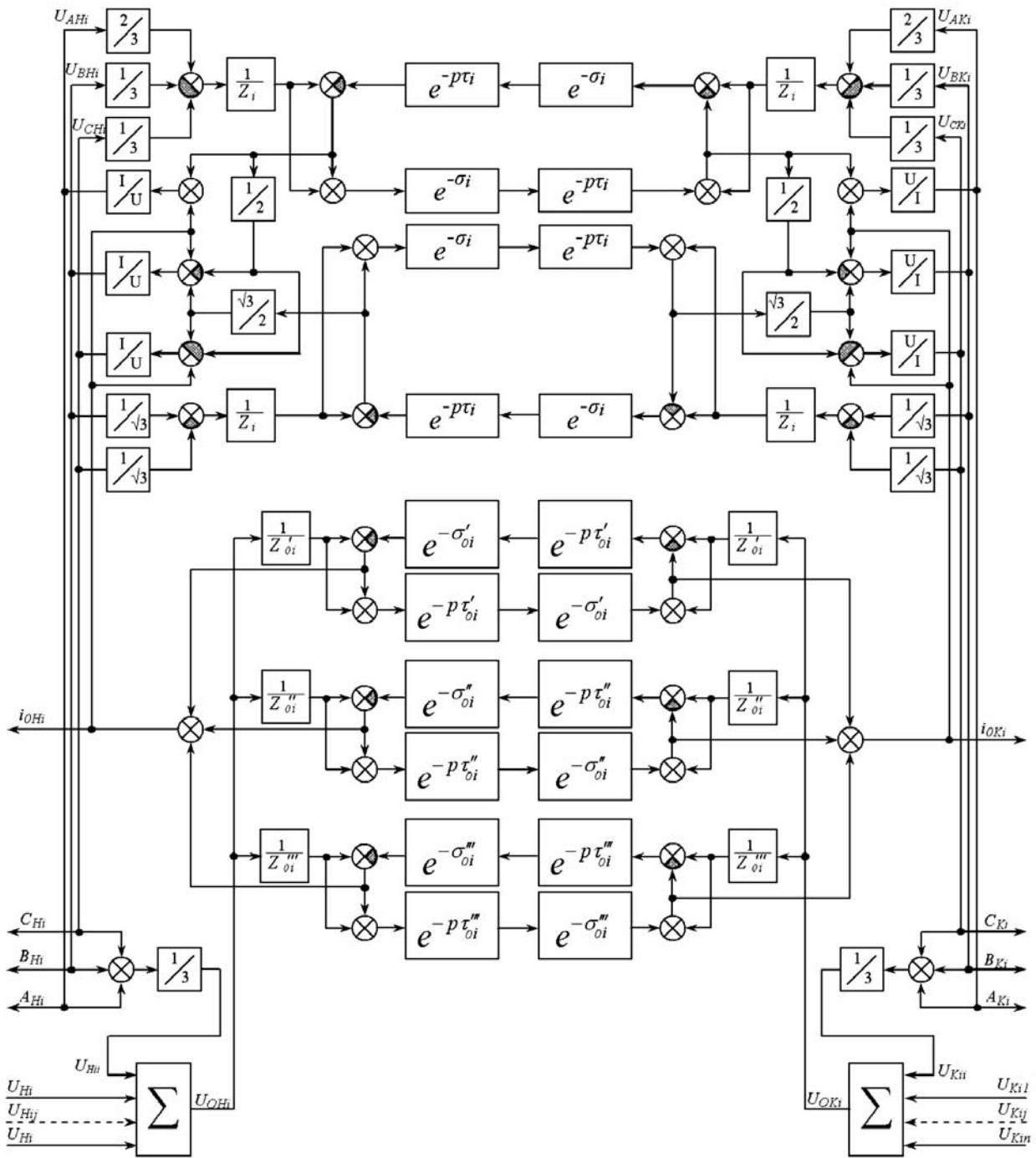


Рис. 1. Функциональная операторная схема гибридного процесса линии

принципами построения сопроцессоров СГП структурная схема СПТЛ приведена на рис. 2.

При учете электромагнитного взаимодействия многоцепных линий с распределенными параметрами основой всережимной математической модели этого процесса служат те же волновые уравнения, но с использованием взаимных параметров, в общем случае Z_{0ij} , t_{0ij} , s_{0ij} , и разрешенные относительно напряжений $U_{nij}(t)$, $U_{kij}(t)$:

$$\begin{aligned}
 U_{n1l}(t) - Z_{0l1}i_{0n1}(t) &= [U_{k1l}(t - t_{0l1}) - Z_{0l1}i_{0k1}(t - t_{0l1})]e^{-s_{0l1}}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 U_{nij}(t) - Z_{0ij}i_{0nj}(t) &= [U_{kij}(t - t_{0ij}) - Z_{0ij}i_{0kj}(t - t_{0ij})]e^{-s_{0ij}}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 U_{nin}(t) - Z_{0in}i_{0nn}(t) &= [U_{kin}(t - t_{0in}) - Z_{0in}i_{0kn}(t - t_{0in})]e^{-s_{0in}}.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

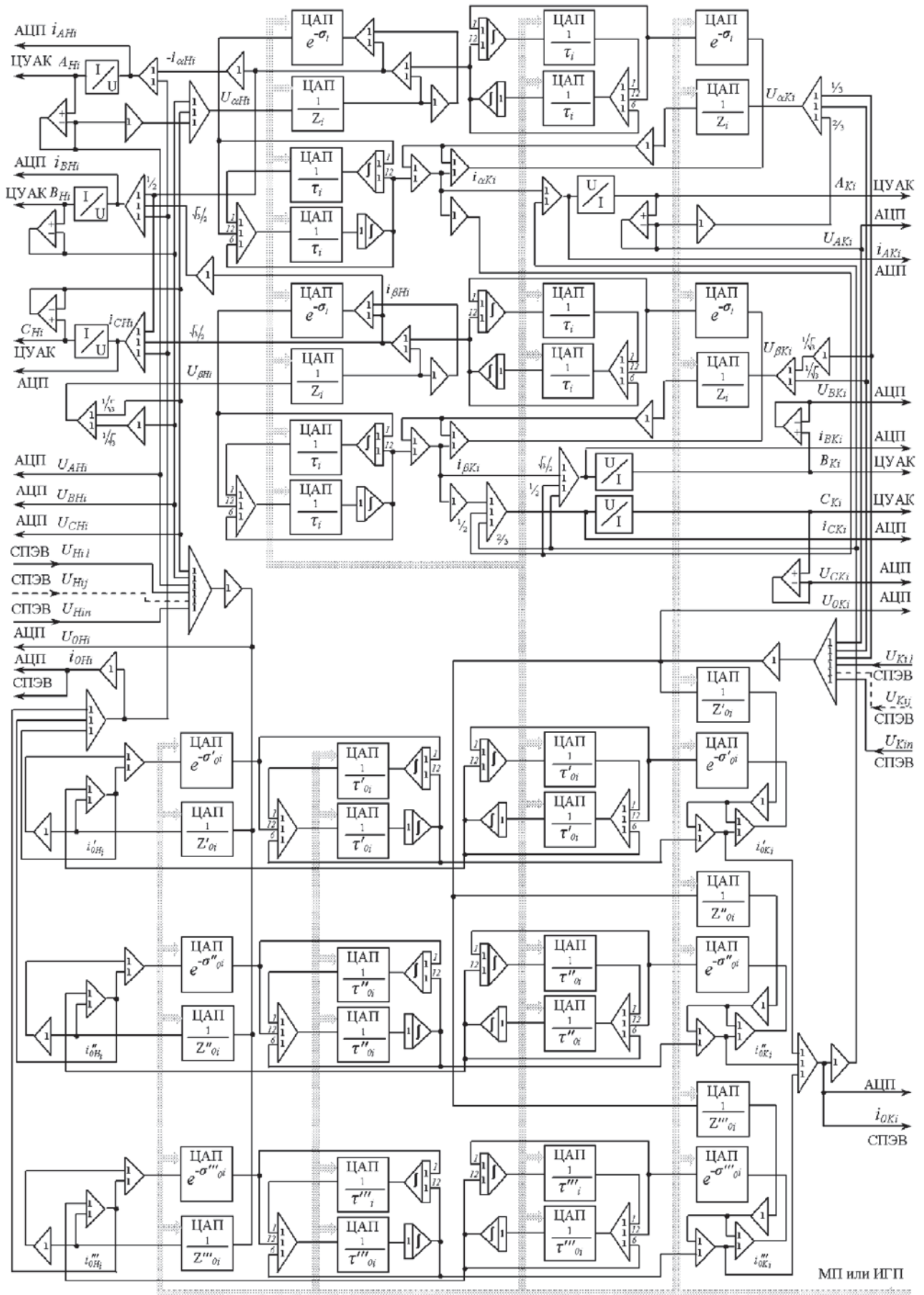


Рис. 2. Структурная схема гибридного процессора линии

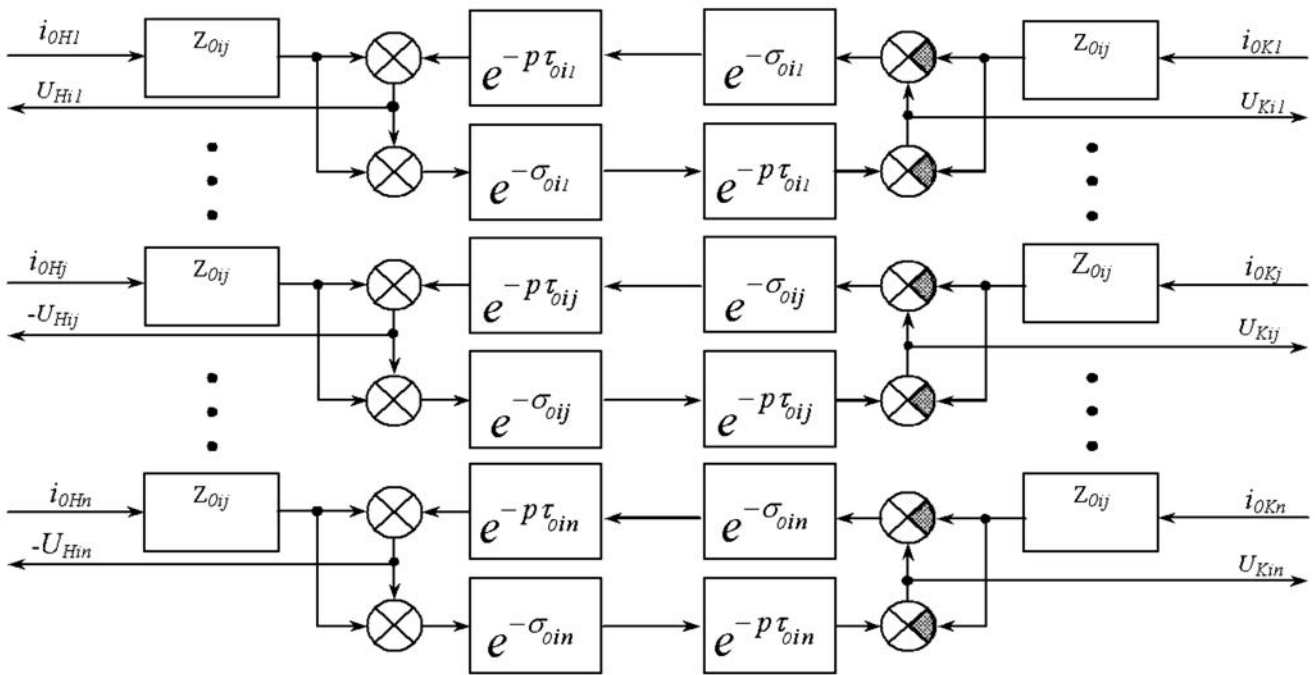


Рис. 3. Функциональная операторная схема блока электромагнитного взаимодействия ЛЭП с распределенными параметрами

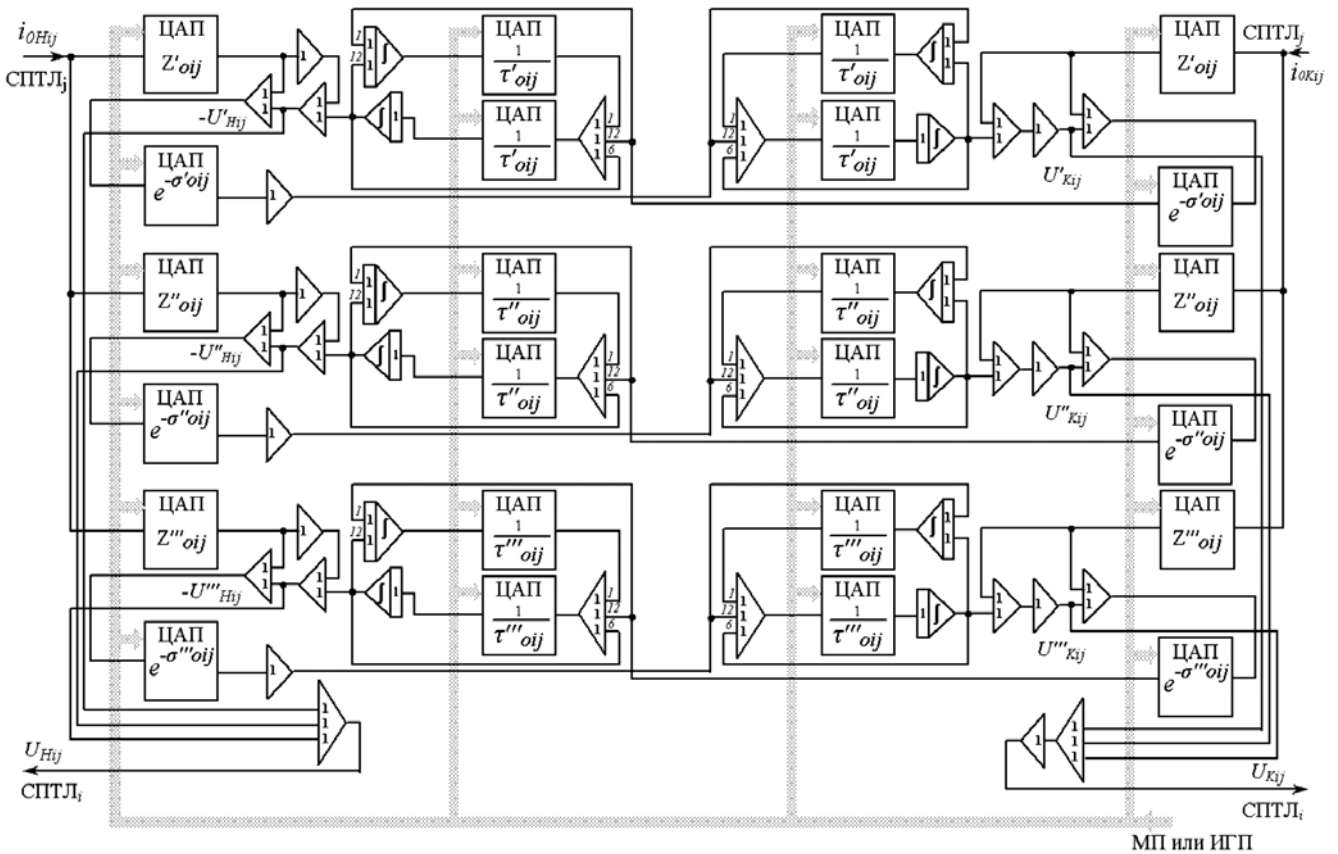


Рис. 4. Структурная схема блока электромагнитного взаимодействия линий с распределенными параметрами

В (9) Z_{0ij} , t_{0ij} , s_{0ij} определяются формулами, аналогичными (5), в которых собственные параметры нулевой последовательности заменяются взаимными r_{0ij} , L_{0ij} , C_{0ij} .

Разработанные на основе системы уравнений (9) с учетом выражения (5) для функции запаздывания функциональная и структурная схемы приведены на рис. 3 и 4.

Представленные решения были реализованы и апробированы во всережимном моделирующем комплексе реального времени Томской энергосистемы [5]. Результаты показали высокую адекватность созданной гибридной модели ЛЭП с распределенными параметрами с учетом электромагнитного взаимовлияния при воспроизведении электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2008, № 9–10/1.
2. Караев Р.И. Переходные процессы в линиях большой протяженности. — М.: Энергия, 1978.
3. Груздев И.А., Кадомская К.П., Кучумов Л.А. и др. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов/Под ред. Н.И. Соколова. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1970.
4. Неклепаев Б.Н. К вопросу об учете взаимной индукции между линиями электропередачи при несимметричных режимах. — Электричество, 1965, № 12.
5. Гусев А.С., Хрушев Ю.В., Гурин С.В. и др. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем. — Электричество, 2009, № 12.

[30.10.12]

Авторы: Сулайманов Алмаз Омурзакович окончил Томский политехнический институт (ТПИ) в 1991 г. В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию «Неактивная мощность и ее составляющие в электроэнергетических системах» в ТПУ. Доцент кафедры «Электроэнергетические системы» (ЭЭС) ТПУ.

Боровиков Юрий Сергеевич окончил ТПУ в 2000 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию «Программно-аппаратные средства для оценки коммутационной напряженности коллекторных электрических машин» в ТПУ. Заведующий кафедрой ЭЭС ТПУ.

Гусев Александр Сергеевич окончил ТПИ в 1973 г. В 2008 г. защитил докторскую диссертацию «Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем» в ТПУ. Профессор кафедры ЭЭС ТПУ.

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (7-495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru