

ШКОЛА MATLAB.

Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники и электромеханики в среде Matlab+Simulink.

Урок. 34. Гибридная генераторная установка постоянного тока с синхронными магнитоэлектрическими машинами

Статья продолжает тематику уроков 24, 25, 26, 28 [3–6], где исследованы способы повышения энергетической эффективности мехатронных систем, построенных на базе вентильной магнитоэлектрической машины с редкоземельными магнитами на роторе (СММ, англ. PMSM — Permanent Magnet Synchronous Machine), и представлены результаты их исследования, подтверждающие возможность включения циркуляции реактивной мощности в контуре «автономный инвертор — СММ» как в электроприводе, так и в генераторной установке.

В данной статье рассматривается генераторная установка постоянного тока, состоящая из двух однотипных каналов, объединенных звеном постоянного тока с емкостным фильтром. Каждый канал содержит синхронную магнитоэлектрическую машину и активный выпрямитель (АВ). Основной проблемой при построении и исследовании таких гибридных генераторных систем является проблема управляемого разделения мощностей между каналами и устранения их влияния друг на друга.

Сергей Герман-Галкин,
д. т. н., профессор

s.german-galkin@am.szczecin.pl

Схема замещения ГГУ

Схема замещения гибридной генераторной установки (ГГУ) приведена на рис. 1 и содержит две генераторные установки, силовые части которых включают синхронные магнитоэлектрические генераторы и активные полупроводниковые выпрямители.

В этой эквивалентной схеме замещения обозначены:

- АВ1, АВ2 — активные выпрямители первого и второго генератора;

- РН1, РТ1 — регулятор напряжения и тока в системе управления активным выпрямителем первого генератора;
- РТ2 — регулятор тока в системе управления активным выпрямителем второго генератора;
- $\vec{E}_{11}, \vec{U}_{11}, \vec{I}_{11}$ — результирующие векторы ЭДС на выходе первого генератора, напряжения на стороне переменного тока АR1 и тока первого генератора;
- $\vec{E}_{12}, \vec{U}_{12}, \vec{I}_{12}$ — результирующие векторы ЭДС на выходе второго генератора, напряжения на стороне переменного тока АR2 и тока второго генератора;

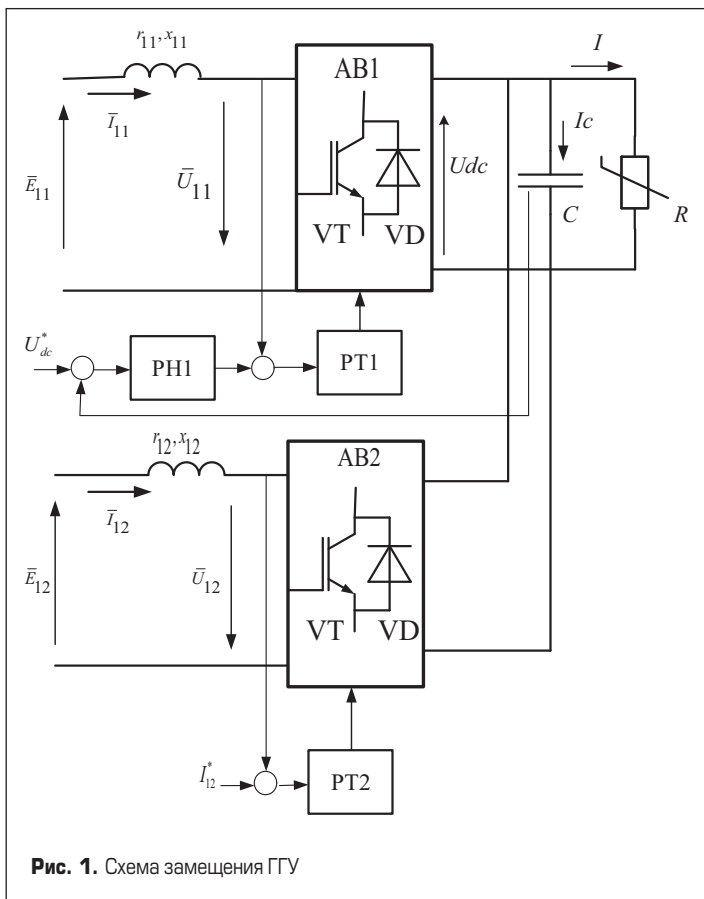


Рис. 1. Схема замещения ГГУ

- U_{dc} — напряжение в цепи постоянного тока (в нагрузке ГГУ);
- $r_{11}, x_{11} = \omega_1 L_{11}$ — активное и реактивное сопротивления первого генератора;
- $r_{12}, x_{12} = \omega_2 L_{12}$ — активное и реактивное сопротивления второго генератора;
- R, C — переменная нагрузка и фильтрующий конденсатор в цепи нагрузки (в цепи постоянного тока).

Основное назначение ГГУ — поддерживать постоянное напряжение на выходе $U_{dc} = const$ при различных скоростях вращения валов генераторов и при изменении нагрузки.

По отношению к нагрузке активные выпрямители выполняют функцию управляемых источников тока, что обеспечивается релейными регуляторами тока (PT1, PT2).

В качестве переменных режима в ГГУ с рассматриваемой структурой выступают:

- скорость вращения вала первого генератора ω_{m1} ;
- скорость вращения вала второго генератора ω_{m2} ;
- ток нагрузки ГГУ, который при постоянном напряжении U_{dc} пропорционален мощности в нагрузке;
- ток задания I_{12}^* на входе регулятора тока АВ2 во втором канале.

Система управления активным выпрямителем в первом канале поддерживает постоянным напряжение нагрузки за счет внешнего (по отношению к контуру регулирования тока) ПИ-регулятора напряжения. При таком построении ГГУ первый канал, являясь источником стабильного напряжения (master mode), автоматически изменяет механическую мощность на валу машины и электрическую мощность в контуре «СММ1-АВ1» при изменении нагрузки.

Изменение скорости вращения вала первого генератора не приводит к изменению механической мощности на его валу и электромагнитной мощности в контуре «СММ1-АВ1».

Второй канал, являясь источником тока (slave mode), изменяет ток (мощность при постоянном $U_{dc} = const$) в зависимости от входного сигнала и скорости вращения вала второго генератора. При этом автоматически изменяется распределение мощностей в нагрузке между первым и вторым каналом. Таким образом, распределение мощностей по каналам осуществляется за счет изменения сигнала управления и скорости вращения вала во втором канале ГГУ. Все, что сказано

выше, относится к активным мощностям в первом и во втором канале. Реактивные же мощности в контурах «СММ-АВ» каждого канала могут управляться независимо. Их перекрестное влияние обусловлено протеканием полного тока в контурах «СММ-АВ». Это влияние незначительно и может быть сведено к нулю специальными схематическими построениями.

Анализ электромагнитных и энергетических процессов в ГГУ осуществляется по основной составляющей [1] с использованием метода результирующего вектора [8, 12] на основании схемы замещения.

Математическое описание системы

В эквивалентной схеме замещения (рис. 1) активные выпрямители (АВ1, АВ2) с одной стороны подключены к статорным обмоткам СММ1 и СММ2 с ЭДС ($\bar{E}_{11}, \bar{E}_{12}$), с другой — к общей нагрузке постоянного тока, содержащей сопротивление нагрузки с емкостным фильтром. Индуктивные и активные сопротивления в схеме замещения являются внутренними параметрами машины и преобразователя.

Математическое описание каждой системы «машина — активный выпрямитель» на стороне переменного тока во вращающейся синхронно с валом соответствующей машины системе координат в каждом канале может быть представлено в виде:

$$\bar{E}_{11}(t) = \bar{U}_{11}(t) + L_{11} \frac{d\bar{I}_{11}(t)}{dt} + r_{11}\bar{I}_{11}(t) + jx_{11}\bar{I}_{11}(t), \quad (1)$$

$$\bar{E}_{12}(t) = \bar{U}_{12}(t) + L_{12} \frac{d\bar{I}_{12}(t)}{dt} + r_{12}\bar{I}_{12}(t) + jx_{12}\bar{I}_{12}(t). \quad (2)$$

Значение ЭДС на выходе СММ1 и СММ2 определяется скоростью вращения их валов ω_{m1}, ω_{m2} , числом пар полюсов и потокоцеплением возбуждения

$$\bar{E}_{11}(t) = p_1 \omega_{m1} \bar{\Psi}_{01} = \omega_1 \bar{\Psi}_{01}, \quad (3)$$

$$\bar{E}_{12}(t) = p_2 \omega_{m2} \bar{\Psi}_{02} = \omega_2 \bar{\Psi}_{02}, \quad (4)$$

где p_1, p_2 — число пар полюсов в каждой машине; $\bar{\Psi}_{01}, \bar{\Psi}_{02}$ — потокоцепления возбуждения первого и второго генератора, ω_1, ω_2 — угловые частоты протекания электромагнитных процессов в системах.

При построении векторной диаграммы по уравнениям (1), (2) электромагнитные процессы рассматриваются в системе вращающихся координат (d, q), связанных с конструкцией машины [2], а электромагнитные процессы, связанные с напряжением и током, в активных выпрямителях рассматриваются во вращающейся системе координат x, y . При этом вектор $\bar{\Psi}_{0i}$ соответствующего потокоцепления совмещается с нулевым состоянием датчика положения ротора (ДПР) и направляется по вещественной оси (d) вращающейся системы координат. В этом случае соответствующая ЭДС вращения $\bar{E}_{1i}(t) = p_i \omega_{mi} \bar{\Psi}_{0i} = \omega_i \bar{\Psi}_{0i}$ опережает потокоцепление на 90° эл. и будет направлена по мнимой оси q . Поэтому при построении векторной диаграммы следует, в дополнение к сказанному, учитывать то обстоятельство, что направление векторов потокоцепления и ЭДС в координатах d, q определяются начальной установкой ДПР.

Электромагнитные процессы генераторной установки при различных способах управления активным выпрямителем

Функциональная схема управления активным выпрямителем в каждом канале ГГУ приведена на рис. 2, где обозначены:

- СММ — синхронная магнитоэлектрическая машина;
- ДПР — датчик положения ротора;
- ДТ — датчики фазных токов СММ;
- АВ — активный выпрямитель;
- СУАВ — система управления активным выпрямителем;
- R, C — цепь нагрузки.

Системы управления активными выпрямителями (СУАВ) содержат гистерезисные регуляторы тока с датчиками фазных токов (ДТ)

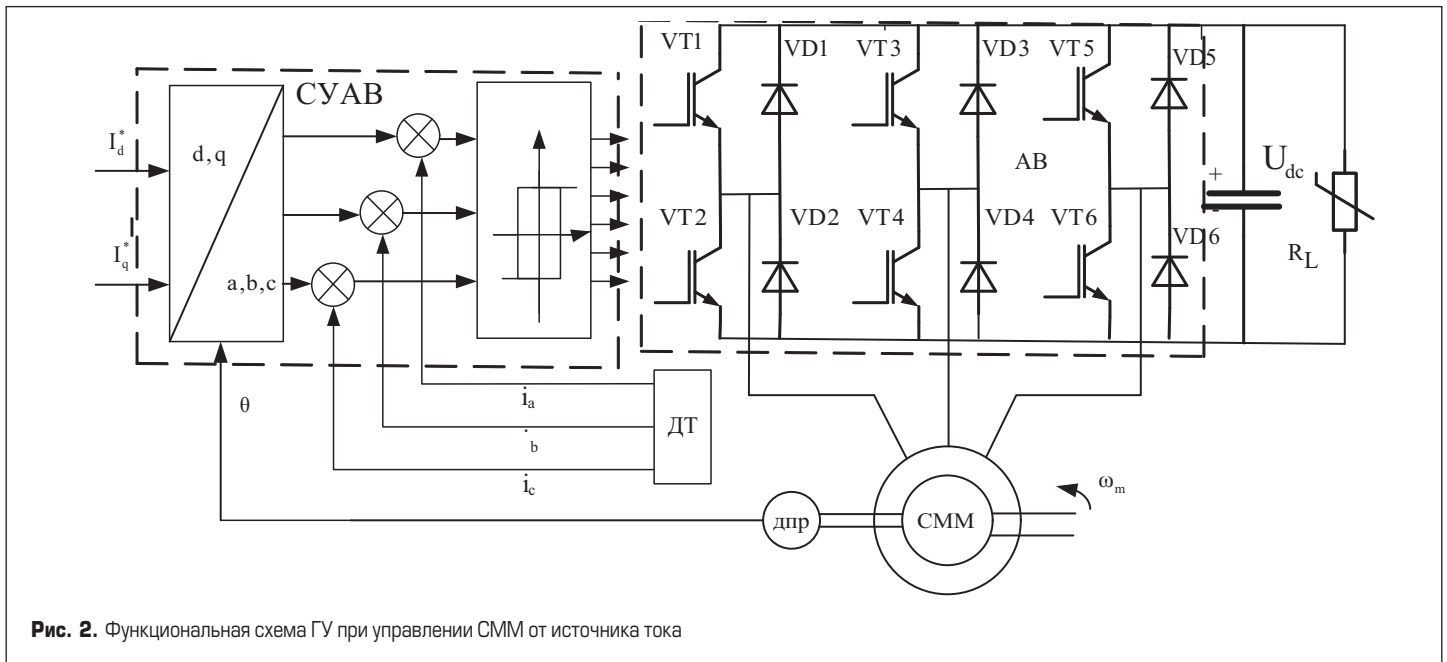


Рис. 2. Функциональная схема ГУ при управлении СММ от источника тока

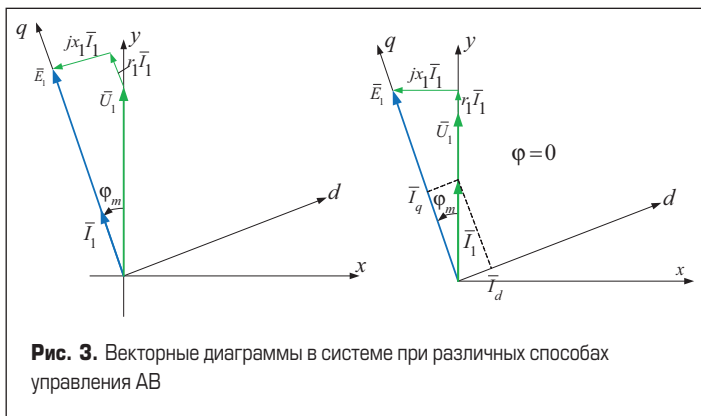


Рис. 3. Векторные диаграммы в системе при различных способах управления АВ

и преобразователи вращающихся координат (d, q) в неподвижные (a, b, c) [7]. Такая структура управления образует замкнутую систему, обеспечивающую токовое управление синхронной магнитоэлектрической машиной [4–6]. Дальнейшие исследования, представленные ниже, осуществлены для генераторных установок, параметры машин в которых одинаковые:

- номинальный момент в длительном режиме работы: 111 Н·м;
- номинальная скорость вращения: 75 рад/с;
- сопротивление обмотки якоря: 0,05 Ом;
- индуктивность обмотки якоря: 0,000635 Гн;
- постоянная по ЭДС: 0,192 Вс/рад;
- число пар полюсов: 4.

Наиболее частым и простым способом управления АВ в системе является управление по одной координате I_q^* [9]. Это управление благодаря наличию ДТР жестко привязано к магнитному полю ротора машины и по аналогии с асинхронными системами может быть названо управлением с ориентацией по магнитному полю ротора (FOC — Field Oriented Control) [12].

При этом сигнал на второй вход (рис. 2) не подается ($I_d^* = 0$). Векторная диаграмма, построенная по уравнению (2), при управлении FOC представлена на рис. 3а. Геометрические соотношения векторной диаграммы позволяют рассчитать электромагнитные и энергетические характеристики каждой генераторной установки.

Во вращающейся системе координат (d — вещественная ось и q — мнимая ось) при совмещении вещественной оси с вектором потокоцепления возбуждения СММ уравнения (2), (3) в осях d, q можно записать в виде:

$$0 = U_{di}(t) + L_{li} \frac{dI_{di}(t)}{dt} + r_{li} I_{di}(t) - x_{li} I_{qi}(t),$$

$$E_{ii} = E_{qi} = U_{qi}(t) + L_{li} \frac{dI_{qi}(t)}{dt} + r_{li} I_{qi}(t) + x_{li} I_{di}(t). \quad (5)$$

Напомним, что запись $I_d(t), I_q(t), E_1(t), U_{dc}(t), I_{dc}(t)$ в уравнениях (5) подчеркивает, что эти величины являются постоянными с изменяющимися во времени максимальными значениями. Изменения максимальных значений токов, напряжения и ЭДС наблюдаются во время переходных процессов.

Уравнения (5) электромагнитных процессов в установившемся режиме работы могут быть записаны в виде:

$$0 = U_{di} + r_{li} I_{di} - x_{li} I_{qi}, \quad E_{ii} = U_{qi} + r_{li} I_{qi} + x_{li} I_{di}. \quad (6)$$

Энергетические характеристики системы «СММ-АВ» рассчитываются с использованием геометрических соотношений векторной диаграммы (рис. 3а):

$$P_{ii} = 1,5(U_{di} I_{di} + U_{qi} I_{qi}),$$

$$Q_{ii} = 1,5(U_{qi} I_{di} - U_{di} I_{qi}), \quad P_{dc} = U_{dc} I_{dc} = U_{dc}^2 / R. \quad (7)$$

Уравнения (6), (7) разрешимы и позволяют рассчитать электромагнитные и энергетические характеристики системы «СММ-АВ» при заданных токах I_{d1}, I_{q1} . Однако такое управление возможно осуществить только во втором канале (*slave mode*). В первом канале (*master mode*), отвечающем за стабилизацию напряжения в нагрузке, значения токов устанавливаются автоматически в зависимости от переменных режима, перечисленных выше.

Электромагнитные и энергетические характеристики генераторной установки при FOC-управлении АВ2

При задании тока управления и скорости во втором канале ГГУ из геометрических соотношений (рис. 3а) для заданных U_{dc} и R рассчитываются электромагнитные и энергетические характеристики в обоих каналах.

Для второго канала ГГУ:

$$I_{d2} = 0, I_{q2} = I_{12}, \quad U_{d2} = -r_{l2} I_{d2} + x_{l2} I_{q2},$$

$$U_{q2} = E_{12} - r_{l2} I_{q2} - x_{l2} I_{d2}, \quad P_{12} = 1,5(U_{d2} I_{d2} + U_{q2} I_{q2}),$$

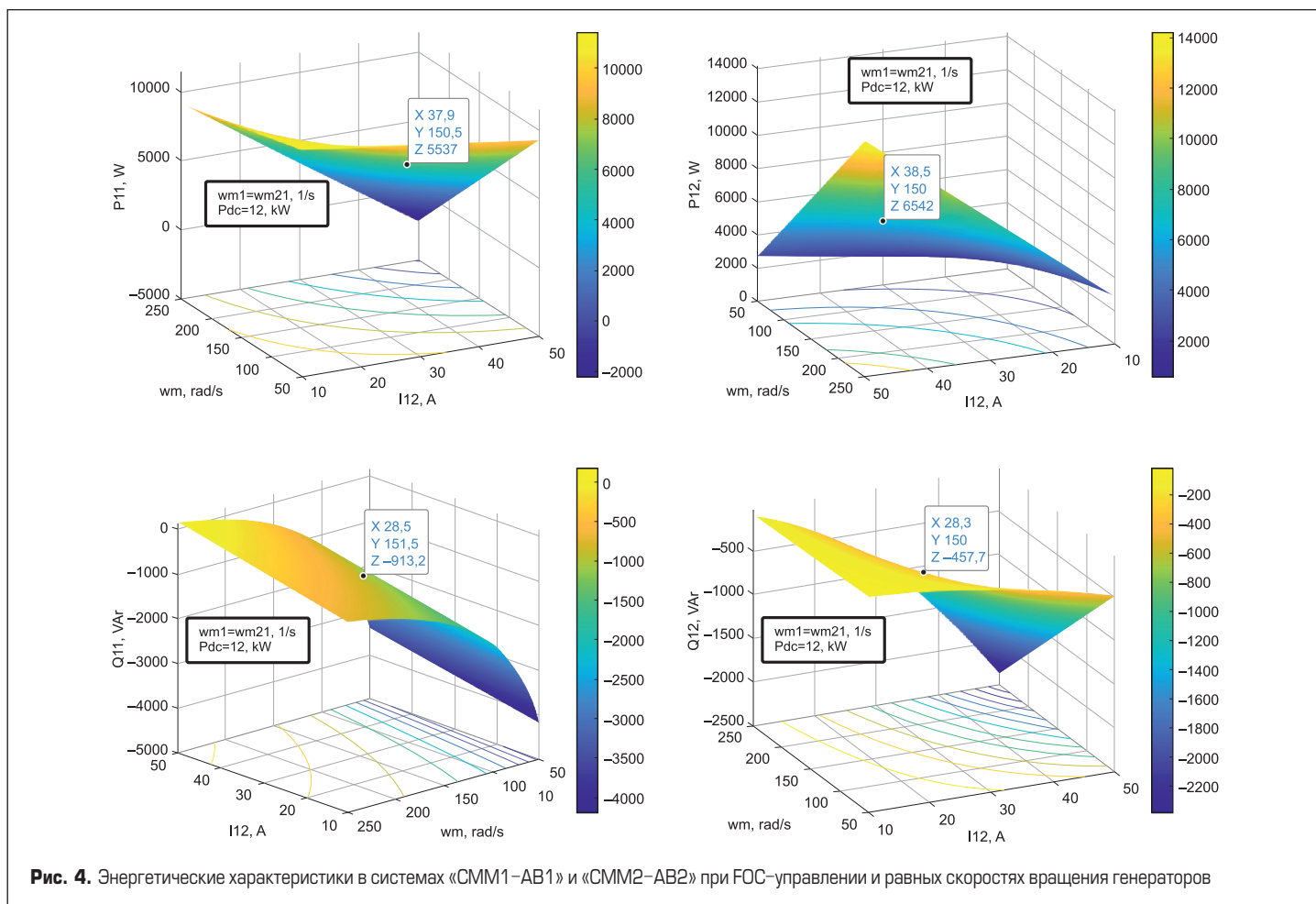
$$Q_{12} = 1,5(U_{q2} I_{d2} - U_{d2} I_{q2}), \quad P = \frac{U_{dc}^2}{R}. \quad (8)$$

Для первого канала ГГУ:

$$P_{11} = P_{dc} - P_{12}, \quad \varphi_{m1} = \arctg \frac{r_{l1}}{x_{l1}}, \quad U_{11} = E_{11} \cos \varphi_{m1}, \quad I_{11} = \frac{P_{11}}{1,5 U_{11}},$$

$$I_{q1} = I_{11} \cos \varphi_{m1}, \quad I_{d1} = I_{11} \sin \varphi_{m1}, \quad U_{d1} = -r_{l1} I_{q1} + x_{l1} I_{d1},$$

$$U_{q1} = E_{11} - r_{l1} I_{q1} + x_{l1} I_{d1}, \quad Q_{11} = 1,5(U_{q1} I_{d1} - U_{d1} I_{q1}). \quad (9)$$



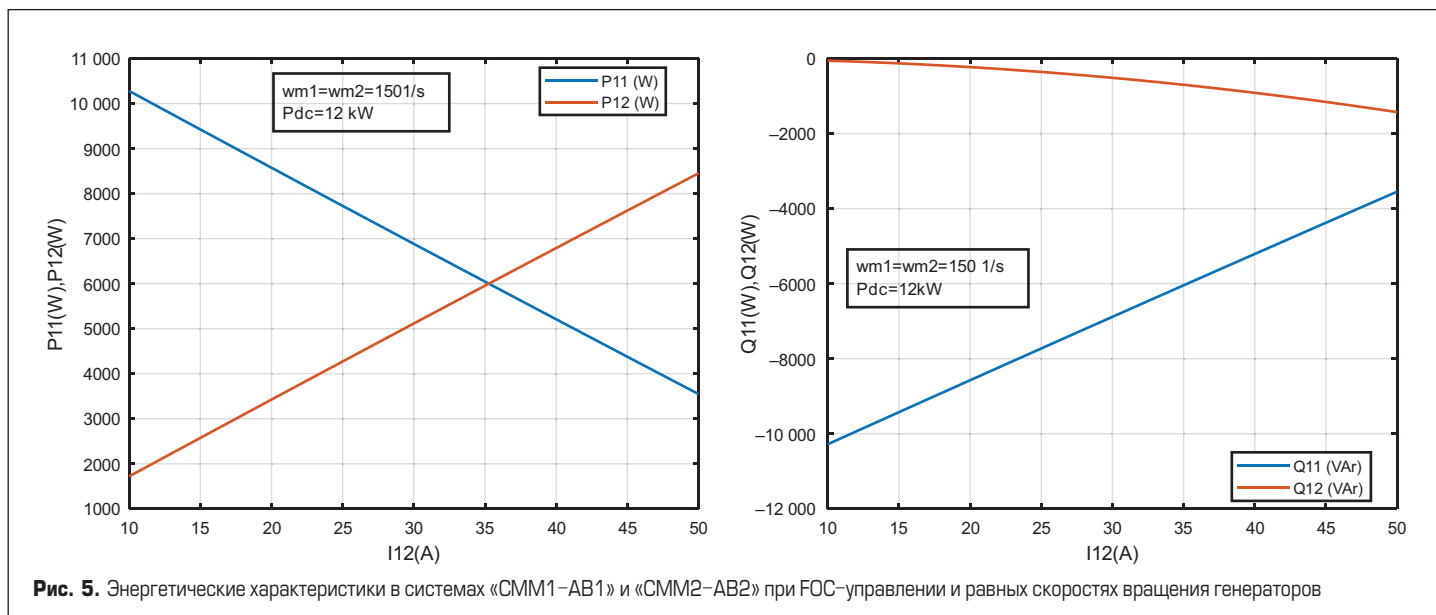
Зависимости активной и реактивной мощности на выходе генераторов от тока управления во втором канале, рассчитанные по уравнениям (8), (9), представлены на рис. 4.

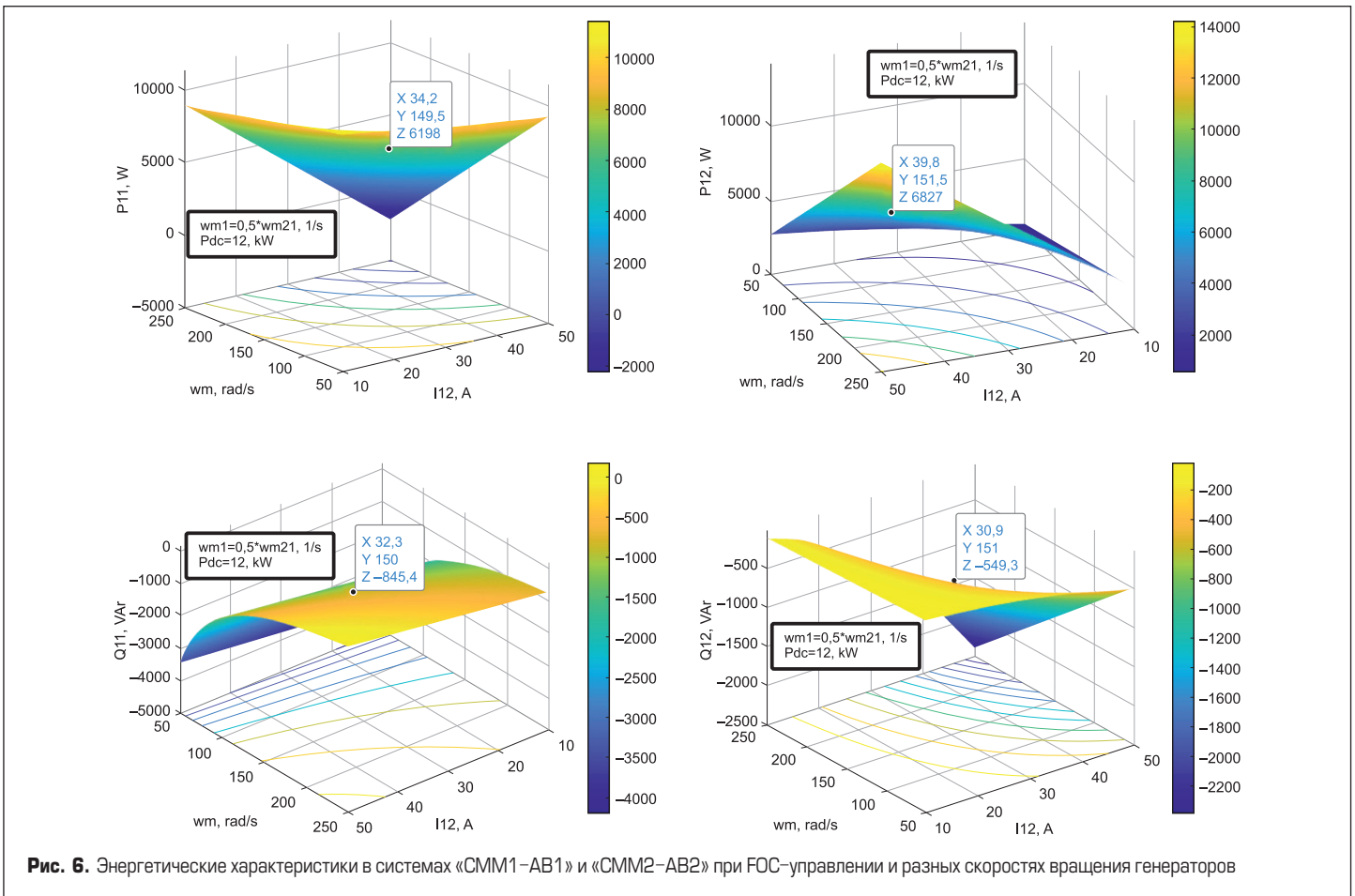
Проекции поверхностей рассчитанных величин на основную плоскость показывают зависимости между током и скоростью в соответствующем канале, при которых мощность остается постоянна. Эти зависимости нелинейны.

Рассмотренная система имеет следующие основные свойства:

- Активная мощность в первом канале (*master mode*) растет при увеличении скорости и уменьшении тока управления во втором канале.
- Активная мощность во втором канале (*slave mode*) растет как при увеличении скорости, так и при увеличении тока управления во втором канале.

- Максимальные реактивные (емкостные) мощности в каналах равны приблизительно половине максимальной активной мощности.
- Реактивная мощность в первом канале (*master mode*) растет при уменьшении скорости и уменьшении тока управления во втором канале, при этом при малых скоростях она практически не зависит от тока управления.
- Реактивная мощность во втором канале (*slave mode*) растет как при увеличении скорости, так и при увеличении тока управления во втором канале.
- Распределение активных мощностей в системе поддерживается автоматически так, что их сумма составляет мощность в нагрузке. Более наглядную картину распределения мощностей представляют двумерные зависимости активной и реактивной мощности в каждом канале





от тока управления второго канала при одинаковых постоянных скоростях вращения обоих генераторов. Эти зависимости приведены на рис. 5.

При увеличении тока управления во втором канале в нем линейно растет активная электромагнитная мощность. При этом электромагнитная мощность в первом канале уменьшается так, что сумма этих мощностей остается постоянной и равной мощности в нагрузке.

На рис. 6 представлены энергетические характеристики для различных скоростей вращения валов генераторов. Их сравнение с предыдущими (рис. 4) свидетельствует о неизменном характере распределения мощностей в каналах.

Электромагнитные и энергетические характеристики генераторной установки при оптимальном управлении в обоих каналах

Если в активном выпрямителе используется токовое управление, то в системе «СММ-АВ», управляя по координате q и d , можно поддерживать нулевую реактивную мощность при изменении скорости и нагрузки [5].

Такой режим работы генераторной установки назван оптимальным. Векторная диаграмма для оптимального режима работы приведена на рис. 3б. Из геометрических соотношений векторной диаграммы можно определить продольную и поперечную составляющие токов, при которых реактивная мощность в системе «СММ-АВ» поддерживается равной нулю. Расчет энергетических характеристик генератора при оптимальном управлении выполняется по уравнениям, полученным из геометрических соотношений векторной диаграммы.

Для второго генератора:

$$\varphi_{m1} = \arcsin\left(\frac{x_{11}I_1}{E_1}\right), \quad I_{d2} = I_1 \sin \varphi_m, \quad I_{q2} = I_1 \cos \varphi_m,$$

$$U_{d2} = -r_{12}I_{q2} + x_{12}I_{d2}, \quad U_{q2} = E_{12} - r_{12}I_{d2} + x_{12}I_{q2},$$

$$P_{12} = 1,5(U_{d2}I_{d2} - U_{q2}I_{q2}), \quad Q_{12} = 1,5(U_{q2}I_{d2} - U_{d2}I_{q2}), \quad P_{dc} = \frac{U_{dc}^2}{R}. \quad (10)$$

Для первого генератора:

$$P_{11} = P_{dc} - P_{12}, \quad \varphi_{m1} = \arctg\left(\frac{r_{11}}{x_{11}}\right), \quad I_{11} = \frac{E_{11}}{x_{11}} \sin \varphi_{m1}, \quad U_{11} = \frac{P_{11}}{1,5I_{11}},$$

$$I_{d1} = I_{11} \cos \varphi_{m1}, \quad I_{q1} = I_{11} \sin \varphi_{m1}, \quad U_{d1} = -r_{11}I_{d1} + x_{11}I_{q1},$$

$$U_{q1} = E_{11} - r_{11}I_{q1} + x_{11}I_{d1}, \quad Q_{11} = 1,5(U_{q1}I_{d1} - U_{d1}I_{q1}). \quad (11)$$

Рассчитанные и построенные энергетические характеристики системы в пространственных координатах при оптимальном управлении представлены на рис. 7, из которых следует:

- При оптимальном управлении АВ1 активная электромагнитная мощность в первом канале зависит только от скорости вращения вала первого генератора. Эта мощность нелинейно растет с увеличением скорости.
- При оптимальном управлении АВ2 активная электромагнитная мощность во втором канале зависит как от скорости вращения второго генератора, так и от тока управления. Она растет как с уменьшением скорости, так и с уменьшением тока управления.
- В системе с оптимальным управлением в обоих каналах реактивные мощности в них равны нулю.

Модельное исследование генераторной установки

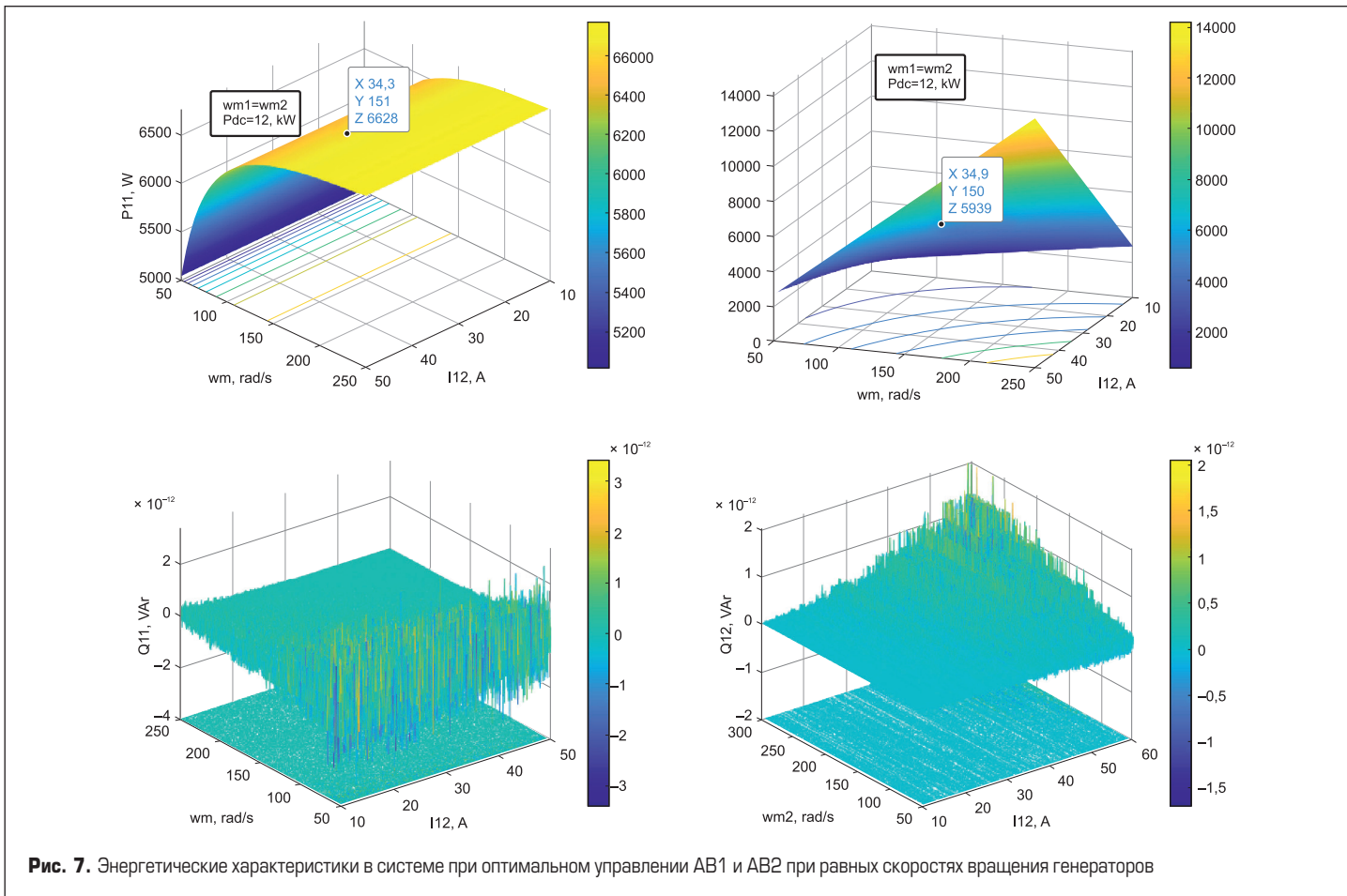
Модельные исследования проводились для генераторных установок с FOC-управлением и с оптимальным управлением.

Модель (рис. 8) содержит силовые части систем (PMSG1-AR1; PMSG2-AR2), управляющие части (CSAR1; CSAR2) и измерительную часть (MEASUREMENTS).

Эта модель позволяет исследовать квазиустановившиеся и квазидинамические электромагнитные и энергетические процессы в генераторной установке с «СММ-АВ».

Заданный ток в СММ1 первого канала формируется на выходе ПИ регулятора, сигналом задания которого является заданное напряжение нагрузки.

Блоки Hist_Control являются релейными регуляторами, реализующими токовое управление в системах «СММ1-АВ1» и «СММ2-АВ2».

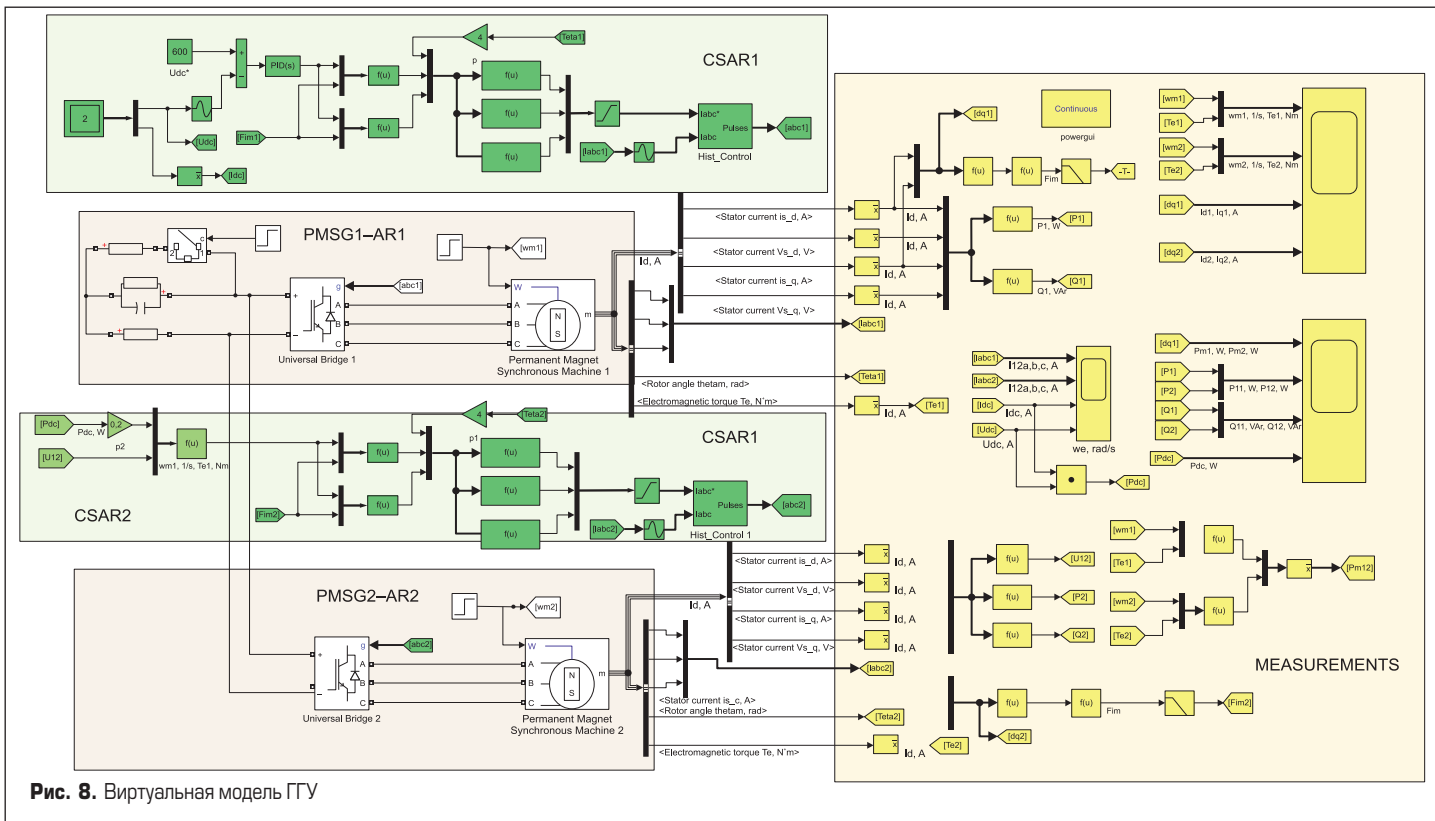


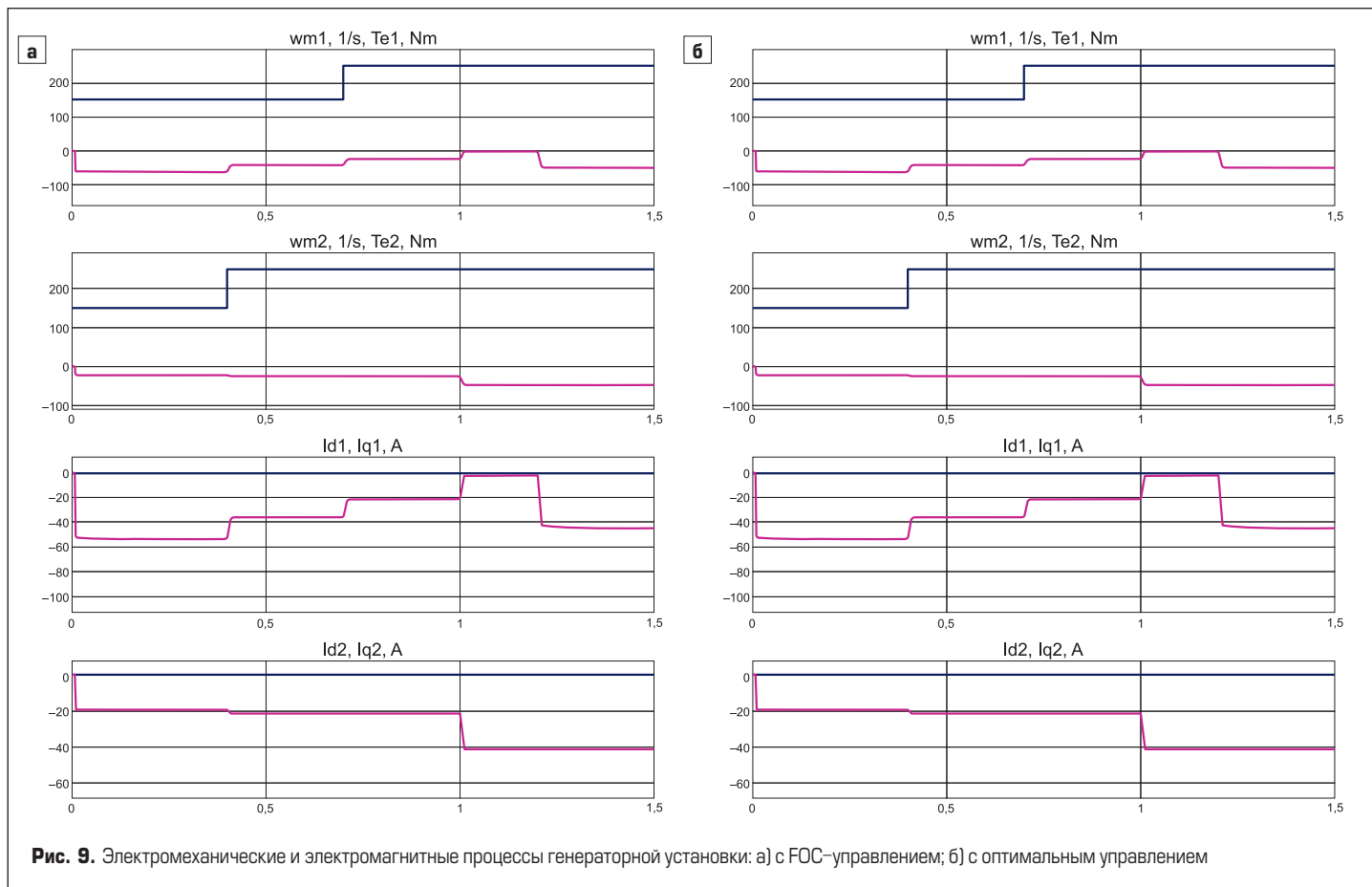
Электромагнитные и энергетические процессы в генераторной установке определялись при моделировании в следующих заданных квазиустановившихся режимах работы (переменных состояния):

1. При постоянных и равных скоростях в обоих каналах, равных 150 рад/с, токе управления во втором канале 20 А и мощности в нагрузке 12 кВт на интервале времени 0–0,4 с.

2. При постоянных и разных скоростях $\omega_{1m} = 150$ 1/с, $\omega_{2m} = 250$ 1/с; мощности в нагрузке 12 кВт, токе управления во втором канале 20 А на интервале времени 0,4–0,7 с.

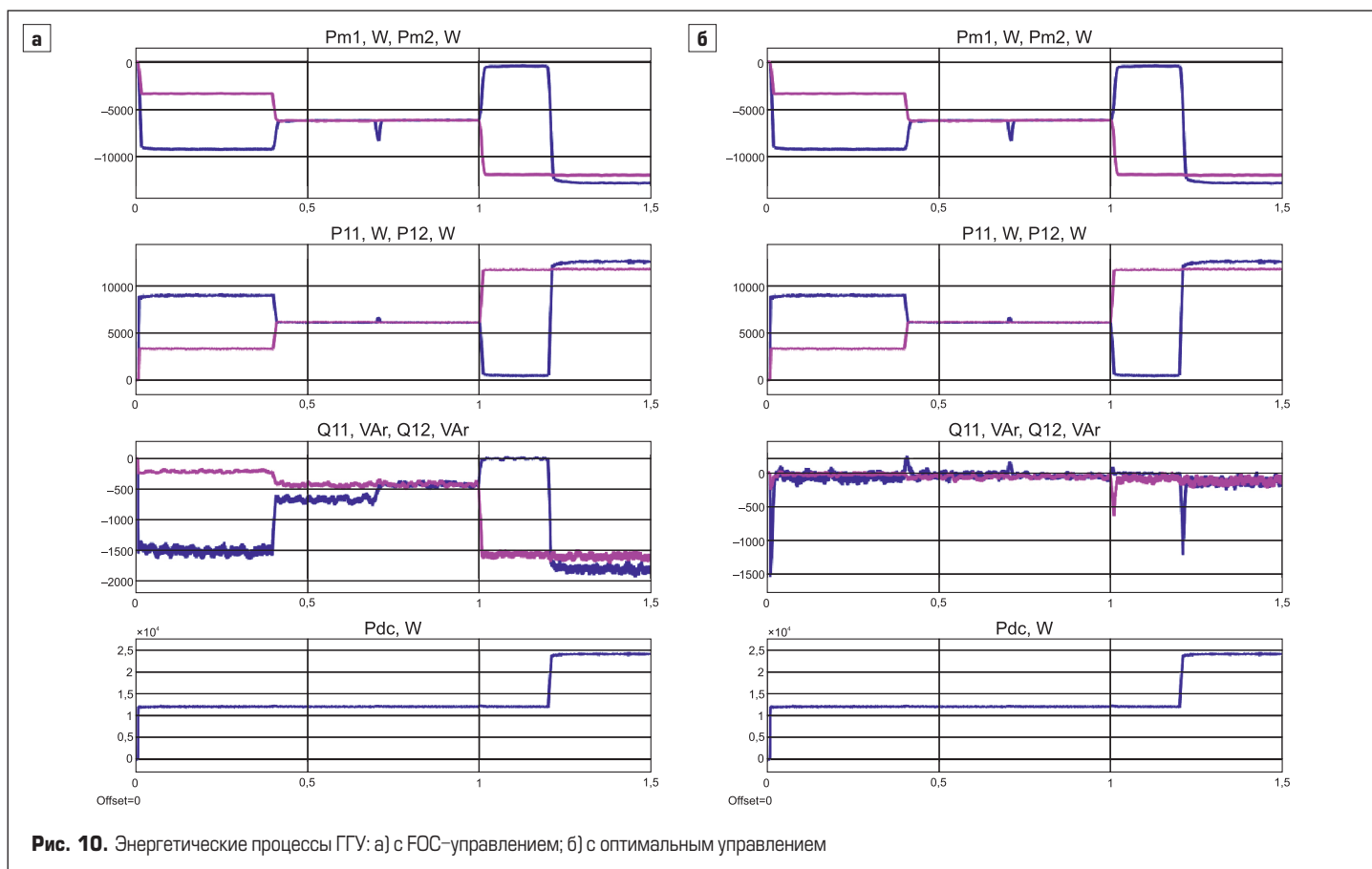
3. При постоянных и равных скоростях $\omega_{1m} = 250$ 1/с, $\omega_{2m} = 250$ 1/с, постоянном токе управления во втором канале 40 А на интервале времени 1–1,2 с.

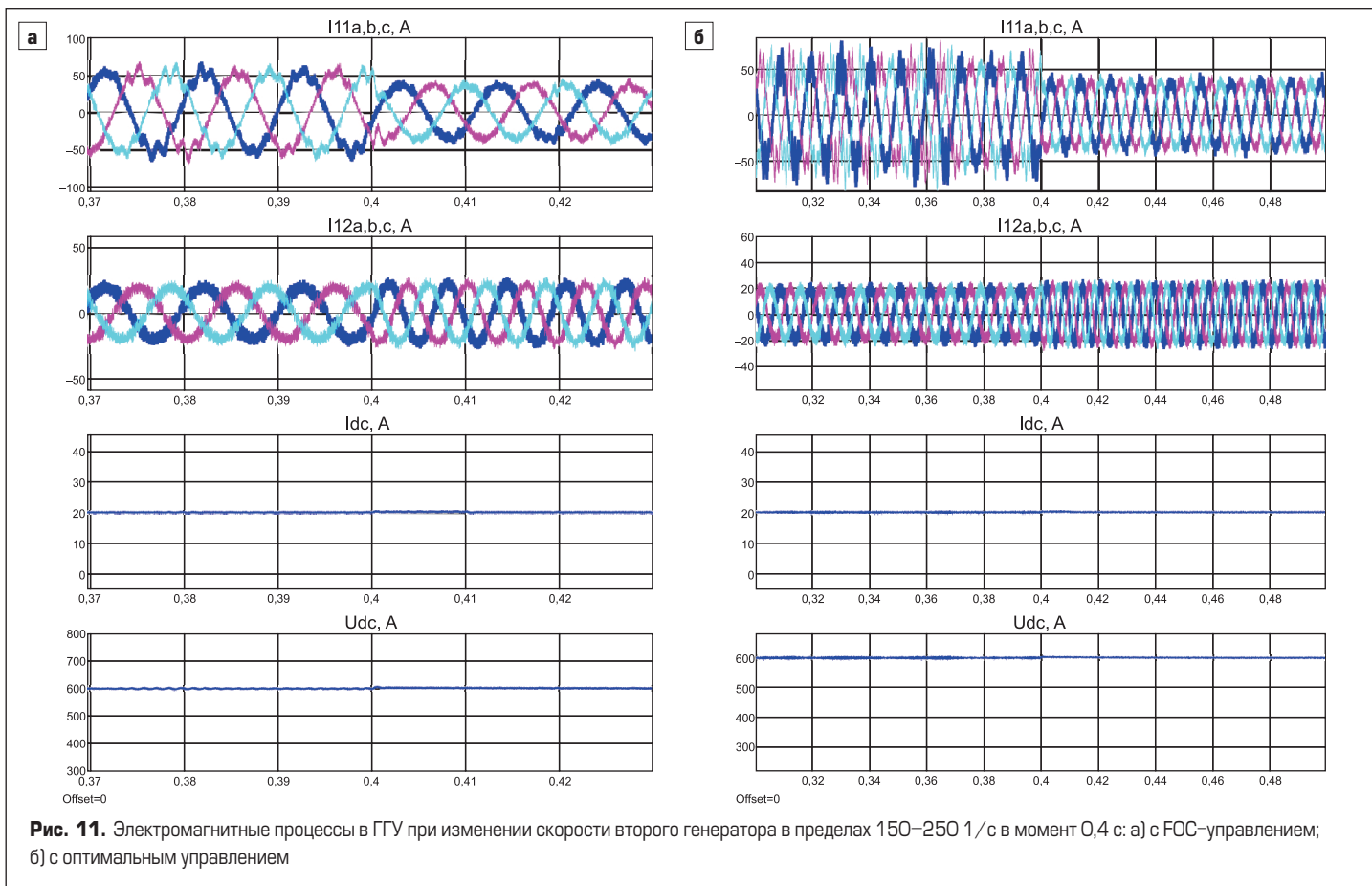




4. При постоянных скоростях $\omega_{1m} = 250$ 1/с, $\omega_{2m} = 250$ 1/с, постоянной мощности нагрузки в 24 кВт, постоянном токе управления во втором канале 40 А на интервале времени 1,2–1,5 с.

Переключение между перечисленными квазиустановившимися режимами осуществляется при скачкообразном изменении соответствующей переменной режима. В момент переключения в системе возникают переходные процессы. Моделирование осуществлялось в генераторной



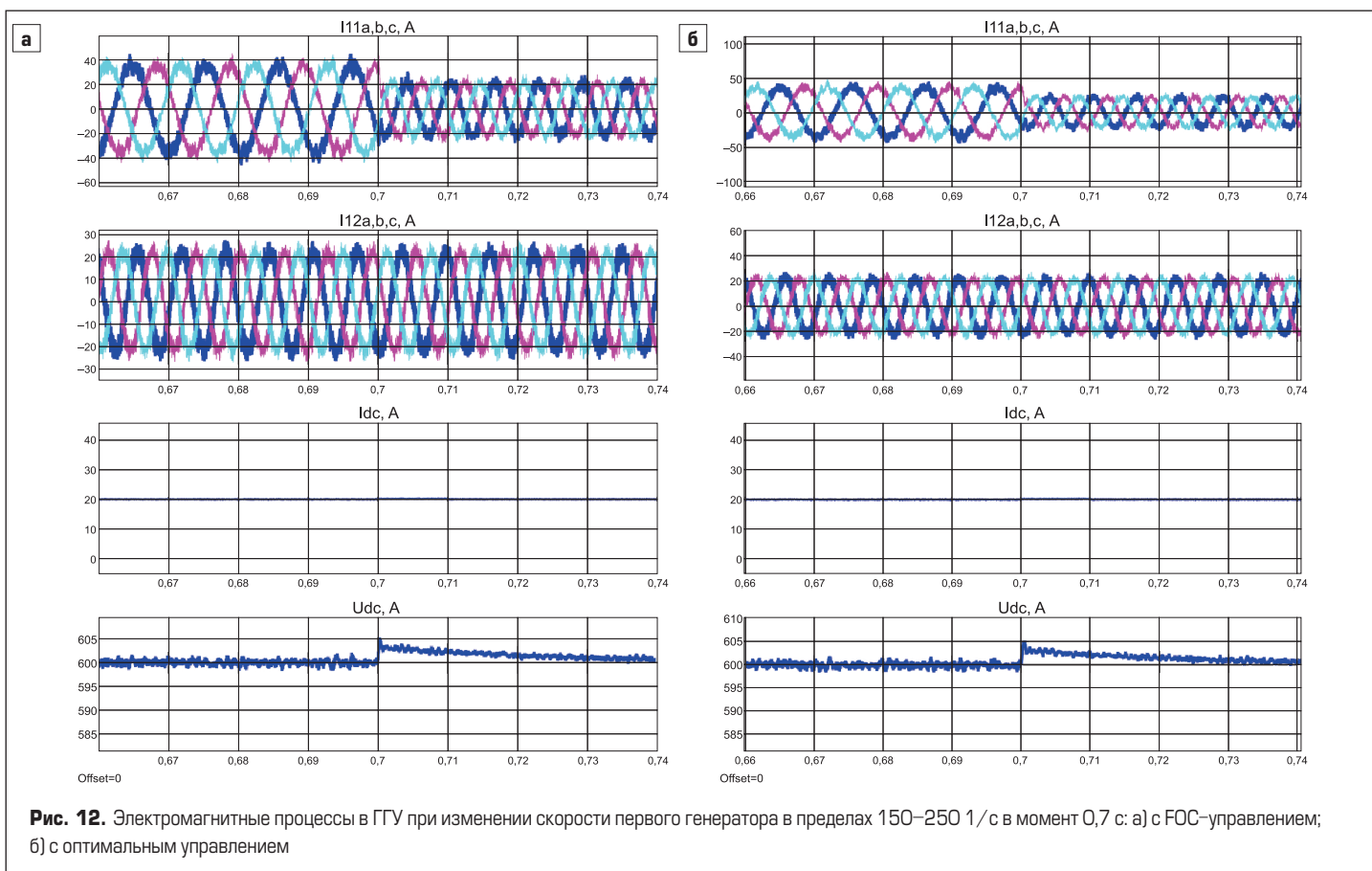


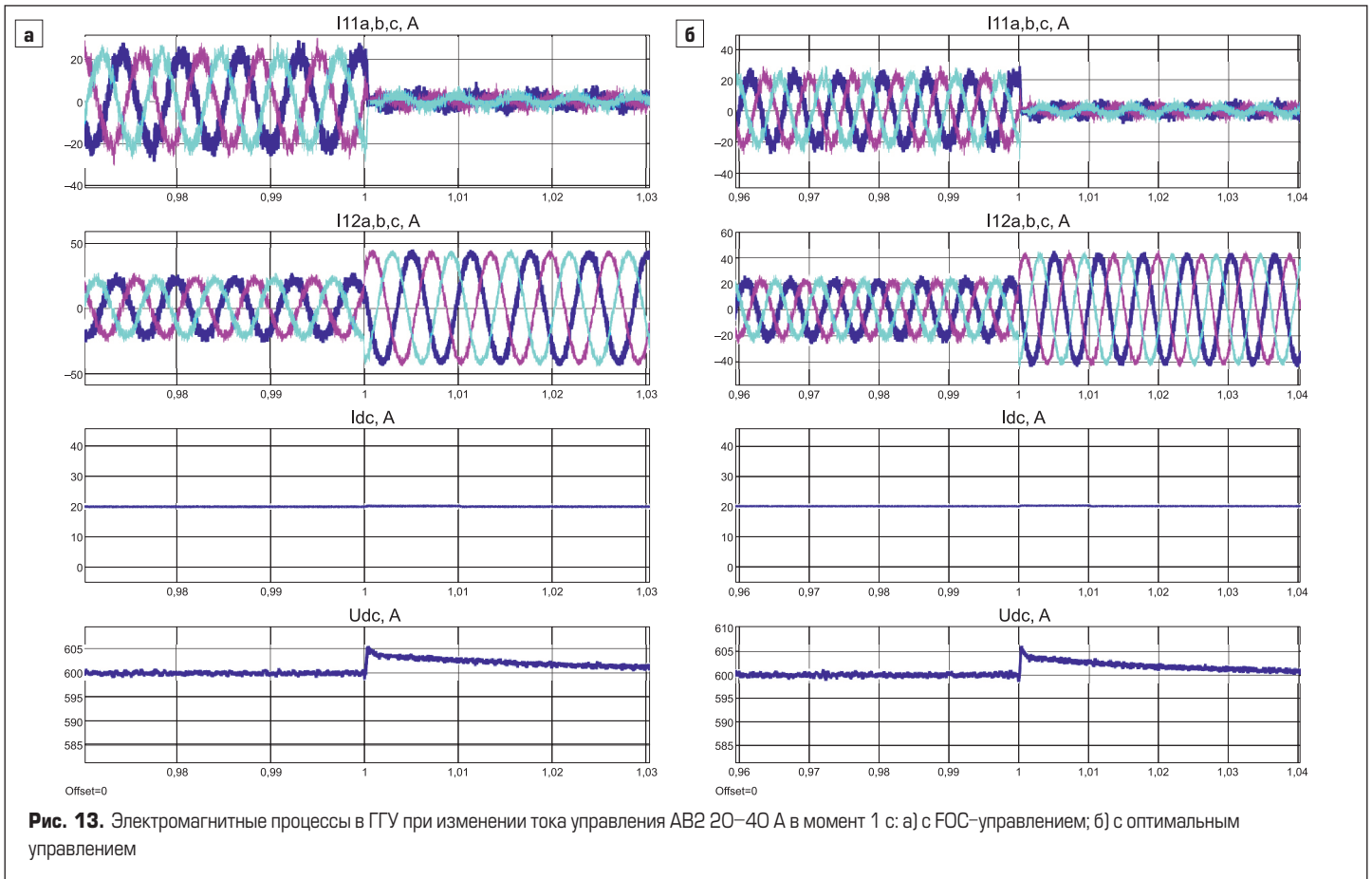
установке с FOC-управлением и в генераторной установке с оптимальным управлением в каждом канале.

Электрохимические процессы генераторной установки (рис. 9) представлены осциллограммами скорости и момента в каждом канале

генераторной установки, а электромагнитные — токами в якоре машины в осях d и q соответствующего канала.

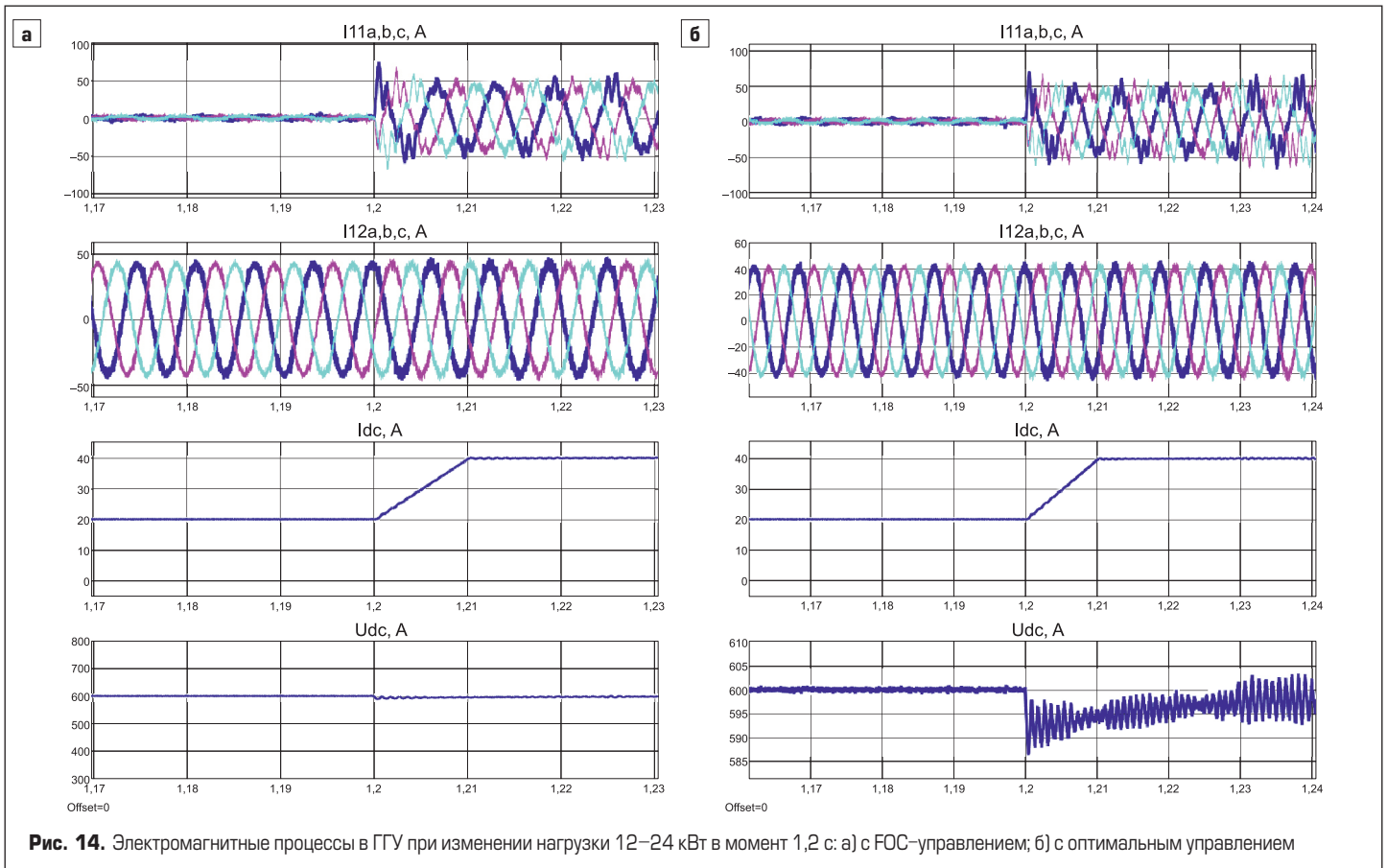
Энергетические характеристики ГГУ (рис. 10) представлены активными, реактивными мощностями в каждом канале, а также мощностью в нагрузке.





Изменение скорости второго генератора (в момент $t = 0,4$ с) и изменение тока управления во втором канале (в момент $t = 1$ с) автоматически сказывается на энергетических процессах в цепи первого и второго генераторов. Изменение скорости вращения первого гене-

ратора (момент $t = 0,7$ с) не сказывается на распределении мощностей по каналам. Из сказанного следует, что управление распределением мощности между параллельно работающими генераторами можно осуществлять только по второму каналу ГГУ, предварительно задав



требуемое распределение между мощностью в нагрузке и мощностью первого канала $\alpha = P_{11}/P_{ds}$. Ток управления вторым каналом можно определить по уравнению:

$$I_{q2}^* = \frac{P_{dc}(1-\alpha)}{1,5U_{12}}, \quad (12)$$

в котором U_{12} — амплитуда основной гармоники фазного напряжения на стороне переменного тока АВ2.

Электромагнитные процессы при переключении между квазиустановившимися режимами представлены токами якоря обоих генераторов, током и напряжением нагрузки. Эти процессы приведены на рис. 11–14.

Заключение

Создание интеллектуальных систем и сетей (*Smart Grid*), оптимизированных по энергетическим характеристикам, ставит задачу управляемого разделения мощности между отдельными параллельно включенными каналами. Эта задача не нова, аналогичные задачи решались и решаются в электрических сетях автономных объектов наземного, водного, подводного и авиационного транспорта. Классические системы параллельно работающих генераторов переменного тока [3, 14–17] требуют применения сложных систем стабилизации скорости и напряжения и не гарантируют отсутствия обменных колебаний мощности между генераторами [11]. Проблемы стабилизации и разделения мощностей в значительной степени устраняются с применением современных мехатронных систем. Силовые полупроводниковые преобразователи в этих системах позволяют построить отдельные источники тока (*slave mode*) и соединить их параллельно, исключив при этом обменные колебательные процессы. Роль источника напряжения в таком случае (*master mode*) выполняет один из параллельно включенных каналов, на входе которого используется регулятор напряжения. Аналитическое исследование электромагнитных и энергетических характеристик двух генераторов позволяет интегрально оценить их свойства в установившихся режимах работы.

Разработанная и представленная в статье виртуальная модель позволяет исследовать любые возможные случаи перераспределения мощностей двух генераторов как в установившихся, так и переходных режимах работы.

Литература

1. Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970.
2. Бродовский В. Н., Иванов Е. С. Приводы с частотно-токовым управлением. М.: Энергия, 1974.
3. Васков А. Г., Тягунов М. Г. Распределенные системы энергоснабжения на основе гибридных энергокомплексов с установками возобновляемой энергетики // Новое в российской электроэнергетике. 2013. № 4.
4. Герман-Галкин С. Г. ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники и электромеханики в среде

- Matlab+Simulink. Урок 24. Мехатронная система с магнитоэлектрическим генератором и активным полупроводниковым выпрямителем // Силовая электроника. 2018. № 1.
5. Герман-Галкин С. Г. ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники и электромеханики в среде Matlab+Simulink. Урок 25. Мехатронная система с двумя генераторами в общей электрической сети переменного тока // Силовая электроника. 2018. № 2.
6. Герман-Галкин С. Г. ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники и электромеханики в среде Matlab+Simulink. Урок 26. Оптимизация энергетических свойств мехатронной системы с вентильной электрической машиной // Силовая электроника. 2018. № 3.
7. Герман-Галкин С. Г. ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники и электромеханики в среде Matlab+Simulink. Урок 28. Синтез оптимального управления генераторной установкой с вентильной электрической машиной // Силовая электроника. 2019. № 1.
8. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Пер. с нем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
9. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). Курс лекций. СПб.: КОРОНА — Век, 2006.
10. Розанов Ю. К. Силовая электроника. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
11. Савенко А. Е., Голубев А. Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. Иваново, 2016.
12. Слежановский О. В., Дацковский Л. Х., Кузнецов И. С., Лебедев Е. Д., Тарасенко Л. М. Системы подчиненного регулирования электропривода переменного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоатомиздат, 1983.
13. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Академия, 2006.
14. Соснина Е. Н., Шалухо А. В., Липужин И. А. Simulink-модель ветродизельной электростанции с вставкой постоянного тока. Сборник статей Всеросс. науч.-техн. конф. Актуальные проблемы электроэнергетики. Нижний Новгород, 2015.
15. Тимченко В. Ф. Колебания нагрузок и обменной мощности энергосистем. М.: Энергия, 1975.
16. Токарев Л. Н. Математическое описание, расчет и моделирование физических процессов в судовых электростанциях. Л.: Судостроение, 1980 г.
17. Ясаков Г. С. Корабельные электроэнергетические системы. Ч. 1. СПб., Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова, 1999.
18. German-Galkin S., Tarnapowicz D. ENERGY OPTIMIZATION OF MECHATRONIC SYSTEMS WITH PMSG. 3rd International Conference on Energy and Environmental Protection. Krakow, Poland, September 13–14, 2018.
19. Park R. H. Two-reaction theory of synchronous machines: Generalized method of analysis — part 1. Trans. of AIEE. July, 1929.